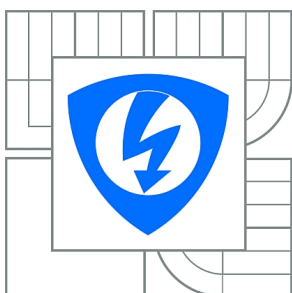




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## MALÝ CNC STROJ

SMALL CNC MACHINE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ MOŠTĚK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FILIP ZÁPLATA

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Jiří Moštěk

**ID:** 125552

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

## Malý CNC stroj

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s možnostmi návrhu vlastního jednoduchého CNC. Zhodnoťte různé možnosti polohování a vyberte vhodné součástky (motory). Navrhněte řízení, zapojení a ovládání celého zařízení. Otestujte jednotlivé komponenty a odhadněte dosažitelnou přesnost.

Sestavte navržené zařízení a otestujte různé možnosti řízení a zadávání příkazů (ruční ovládání, možnosti propojení s PC). Detailně otestujte celkové možnosti zařízení a zhodnoťte dosaženou rychlost, přesnost a uživatelskou přívětivost ovládání.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry Atmel AVR. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

[2] BARR, M., MASSA, A. Programming Embedded Systems with C and GNU Development Tools, 2/E. Sebastopol: O'Reilly, 2006.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 23.5.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Filip Záplata

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a stavbou tříosého CNC stroje primárně určeného k vrtání DPS a výrobu předních panelů pro různá elektronická zařízení. Všechny tři osy jsou poháněny krokovými motory NEMA 23 připojenými k driverům L6470. K řízení celého zařízení je použit procesor ARM STM32F407. Pro komunikaci s uživatelem je zapojení doplněno o dotykový LCD displej. Zadávání dat pro vrtání je možné jak ručně, tak přes rozhraní USB. Součástí této práce je výběr vhodné konstrukce a komponent, sestavení zařízení, návrh zapojení elektronických obvodů a vytvoření kódu pro ovládání celého zařízení. Pro sestavené zařízení jsou otestovány dosažené parametry.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Lineární vedení, krokový motor, řadič L6470, mikroprocesor STM32F407, LCD displej, LCD řadič SSD1963, rezistivní dotyková vrstva, řadič MAX11802, inkrementální spínač, USB HID, zdrojový kód, RTOS, CoCoX, CoOs.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the design and construction of a three-axis CNC machine primarily designed for PCB drilling and production of front panels for various electronic devices. All three axes are driven by stepper motors NEMA 23 which are connected to stepper motor drivers L6470. Processor STM32F407 is used to control the whole machine. The wiring is completed by a LCD display with touchscreen which is used to communicate with user. Data for drilling can be entering manually or via USB interface. Part of this thesis is the selection of a suitable construction and components, assembling equipment, wiring design of electronic circuits and writing the code to control the machine. Finally, the parameters of the designed device have been measured.

## **KEYWORDS**

Linear slide, stepper motor, stepper motor driver L6470, microprocessor STM32F407, LCD display, LCD driver SSD1963, resistive touchscreen, driver MAX11802, incremental switch, USB HID, source code, RTOS, CoCoX, CoOs.

MOŠTĚK, J. *Malý CNC stroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 72 s., 41 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Filip Záplata.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Malý CNC stroj jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Filipu Záplatovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vi</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>ix</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Charakteristika CNC strojů</b>	<b>2</b>
1.1 Vývojové stupně CNC strojů.....	2
1.2 Základní rozdělení CNC strojů.....	3
1.2.1 Rozdělení podle počtu současně řízených os.....	3
1.2.2 Rozdělení podle způsobu řízení současně se pohybujících os.....	3
1.3 Výhody a nevýhody CNC strojů.....	4
<b>2 Mechanická konstrukce</b>	<b>5</b>
2.1 Lineární vedení .....	6
2.1.1 Druhy vedení pro CNC stroje .....	6
2.1.2 Vybraná konstrukční řešení lineárních posuvů.....	6
2.2 Pohybový mechanismus lineárních vedení.....	8
2.3 Servopohony .....	10
2.4 Zvolená konstrukce.....	12
2.4.1 Požadavky a zvolená koncepce stroje.....	12
2.4.2 Pohon a uspořádání lineární osy .....	13
2.4.3 Obráběcí stůl.....	15
2.4.4 Vřeteno.....	15
2.4.5 Výroba stroje.....	15
<b>3 Krokové motory</b>	<b>17</b>
3.1 Konstrukce krokových motorů .....	17
3.1.1 Krokový motor s pasivním rotorem.....	17
3.1.2 Krokový motor s aktivním rotorem .....	18
3.1.3 Lineární krokový motor .....	20
3.2 Způsoby řízení krokových motorů.....	20
3.2.1 Unipolární a bipolární řízení.....	20

3.2.2	Jednofázové a dvoufázové řízení .....	22
3.2.3	Mikrokrokování .....	23
3.3	Základní charakteristiky krokových motorů .....	24
3.4	Budící obvody krokových motorů .....	26
<b>4</b>	<b>Řídicí elektronika</b>	<b>29</b>
4.1	Vývojový kit STM32F4DISCOVERY .....	30
4.2	Driver pro krokové motory .....	32
4.3	TFT displej .....	34
4.4	Krokový motor NEMA23 .....	35
4.5	Napájecí zdroje .....	36
4.6	Celkové zapojení a konstrukce řídicí elektroniky .....	39
4.6.1	Zdrojová část .....	39
4.6.2	Rotační kodéry .....	40
4.6.3	Řídicí část .....	41
<b>5</b>	<b>Program mikrokontroléru</b>	<b>42</b>
5.1	Vývojové prostředí .....	42
5.2	Použité programy .....	43
5.3	Program mikrokontroléru - knihovny .....	45
5.4	Program mikrokontroléru – soubor main .....	53
5.5	Uživatelské rozhraní .....	57
5.6	Nahrávání dat přes USB .....	61
<b>6</b>	<b>Kalibrace a vlastnosti stroje</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>65</b>
	<b>Literatura</b>	<b>67</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>70</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>73</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 CNC s pevným a pohyblivým portálem (Převzato z [3]).	5
Obr. 2.2 Komponenty pro vedení s nepodepřenou tyčí (Převzato z [4], [5], [6]).	7
Obr. 2.3 Komponenty pro vedení s podepřenou tyčí (Převzato z [4], [5], [7]).	7
Obr. 2.4 Kolejnice a vozík pro prizmatické vedení (Převzato z [4]).	7
Obr. 2.5 Trapézový šroub a matice (Převzato z [8]).	8
Obr. 2.6 Trapézový šroub a matice, princip vracení kuliček (Převzato z [9]).	8
Obr. 2.7 Konstrukce válečkového šroubu (Převzato z [13]).	9
Obr. 2.8 Převod s přímým a šikmým ozubením (Převzato z [10] a [11]).	9
Obr. 2.9 Řez stejnosměrným motorem (Převzato z [15]).	10
Obr. 2.10 Řez a průběhy napětí při řízení elektronicky komutovaného motoru (Převzato z [16]).	11
Obr. 2.11 Krokový motor NEMA23 (Převzato z [4]).	12
Obr. 2.12 Výsledné konstrukční řešení CNC stroje.	13
Obr. 2.13 Konstrukční řešení osy Z.	14
Obr. 2.14 Boční pohled na obráběcí stůl.	15
Obr. 2.15 Přímá bruska FERM.	15
Obr. 3.1 Konstrukce krokového motoru s pasivním rotorem (Převzato z [17]).	18
Obr. 3.2 Motor s radiálně polarizovaným magnetem (Převzato z [17]).	18
Obr. 3.3 Motor s axiálně polarizovaným magnetem (Převzato z [18]).	19
Obr. 3.4 Stator a rotor hybridního krokového motoru (Převzato z [19]).	19
Obr. 3.5 Lineární krokový motor (Převzato z [20]).	20
Obr. 3.6 Způsoby zapojení vinutí dvoufázového krokového motoru (Převzato z [18]).	21
Obr. 3.7 Bipolární a unipolární buzení hybridního krokového motoru (Převzato z [18]).	21
Obr. 3.8 Čtyřtaktní řízení s bipolárním buzením jedné a dvou fází dvoufázového hybridního krokového motoru (Převzato z [18]).	22
Obr. 3.9 Osmitaktní řízení s bipolárním buzením dvoufázového hybridního krokového motoru.	22
Obr. 3.10 Proudové jednotlivými fázemi motoru při mikrokrokování (Převzato z [18]).	23
Obr. 3.11 Statistická momentová charakteristika krokového motoru (Převzato z [19]).	24
Obr. 3.12 Momentová charakteristika krokového motoru (Převzato z [19]).	25



Obr. 3.13 Buzení z napěťového zdroje (Převzato z [18]).	26
Obr. 3.14 Buzení vnuceným proudem (Převzato z [18]).	27
Obr. 3.15 Pulzní proudový zdroj - Chopper (Převzato z [18]).	27
Obr. 3.16 Momentová charakteristika krokového motoru pro různé buzení (Převzato z [18]).	28
Obr. 4.1 Blokové schéma řídicí elektroniky.	29
Obr. 4.2 Vývojový kit STM32F4DISCOVERY a jeho blokové schéma (Převzato z [21]).	30
Obr. 4.3 Modul pro řízení krokových motorů (Převzato z [25]).	32
Obr. 4.4 Schéma zapojení modulu pro krokové motory (Převzato z [25]).	32
Obr. 4.5 Blokové schéma obvodu L6470 (Převzato z [26]).	33
Obr. 4.6 Blokové schéma obvodu SSD1963 (Převzato z [29]).	34
Obr. 4.7 Blokové schéma obvodu MAX11802 (Převzato z [30]).	35
Obr. 4.8 Průběh proudu cívkou motoru pro různá budící napětí.	37
Obr. 4.9 Závislost momentové charakteristiky na napětí motoru (Převzato z [32]).	38
Obr. 4.10 Použitý spínaný napájecí zdroj pro buzení krokových motorů.	38
Obr. 4.11 Boční pohled na uspořádání DPS v krabici ovládání.	39
Obr. 5.1 Vývojové prostředí CoIDE.	42
Obr. 5.2 Program MicroXplorer.	43
Obr. 5.3 Aplikace STM32F4xxRev A System Configuration.	44
Obr. 5.4 Program SPINFamily Evaluation Software – Návrh kompenzace BEMF.	44
Obr. 5.5 Hlavičkové soubory volané z l6470.c.	46
Obr. 5.6 Soubory využívající hlavičkový soubor l6470.h.	46
Obr. 5.7 Hlavičkové soubory volané z ssd1963.c.	47
Obr. 5.8 Soubory využívající hlavičkový soubor ssd1963.h.	47
Obr. 5.9 Hlavičkové soubory volané z LCD.c.	48
Obr. 5.10 Soubory využívající hlavičkový soubor LCD.h.	48
Obr. 5.11 Soubory využívající hlavičkový soubor font.h.	48
Obr. 5.12 Hlavičkové soubory volané z max11802.c.	49
Obr. 5.13 Soubory využívající hlavičkový soubor max11802.h.	49
Obr. 5.14 Hlavičkové soubory volané z menu.c.	50
Obr. 5.15 Soubory využívající hlavičkový soubor menu.h.	50
Obr. 5.16 Hlavičkové soubory volané z interrupt.c.	51
Obr. 5.17 Soubory využívající hlavičkový soubor interrupt.h.	51

Obr. 5.18 Hlavičkové soubory volané z relay.c.....	52
Obr. 5.19 Soubory využívající hlavičkový soubor relay.h. ....	52
Obr. 5.20 Spouštění tasků v závislosti na zobrazeném menu. ....	56
Obr. 5.21 Menu pro automatický režim.....	57
Obr. 5.22 Menu pro manuální režim.....	58
Obr. 5.23 Menu pro zadávání dat. ....	59
Obr. 5.24 Zobrazení nastavení motorů. ....	60
Obr. 5.25 Výpis Status registrů.....	60
Obr. 5.26 Ukázka komunikace programu SimpleHIDWrite. ....	62

# SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Základní parametry jednotlivých os. ....	14
Tab. 3.1 Proudby jednotlivými fázemi motoru při mikrokrokování (Převzato z [18]). ...	23
Tab. 4.1 Parametry motoru NEMA23. ....	36
Tab. 4.2 Přehled použitých napájecích napětí. ....	40
Tab. 4.3 Funkce jednotlivých rotačních kodérů. ....	40
Tab. 5.1 Přehled externích přerušení procesoru. ....	51
Tab. 6.1 Odchytky skutečné a požadované polohy při najíždění ze stejného směru.....	63
Tab. 6.2 Odchytky skutečné a požadované polohy při najíždění z opačného směru. ....	63
Tab. 6.3 Vůle v maticích pojezdů při změně směru posuvu a dělení posuvů os. ....	63
Tab. 6.4 Skutečné vlastnosti jednotlivých os stroje.....	64

# ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí tříosé CNC vrtačky. Hlavním cílem je zkonstruovat stroj s dostatečnou přesností pro vrtání DPS o velikosti alespoň formátu A4. Vzhledem k možnosti vyvíjení zařízení v budoucnosti a možnosti rozšíření funkce na frézování např. čelních panelů pro elektronická zařízení byl při výrobě dán zřetel i na dostatečnou tuhost vrtačky. Kvůli nezávislosti zařízení na PC je přístroj ovládán procesorem ARM, který řídí všechny procesy při vrtání. Procesor komunikuje s okolím prostřednictvím LCD displeje s dotykovou vrstvou a několika ovládacími prvky.

Práce je rozdělena do sedmi kapitol. V první kapitole je uvedena obecná charakteristika a základní dělení CNC strojů. Druhá kapitola je věnována mechanické konstrukci zařízení. Jsou zde popsány různé typy uložení posuvů lineárních os a možnosti převodu rotačního pohybu motorů na pohyb lineární za účelem polohování os. Dále zde jsou také porovnány jednotlivé druhy motorů použitelné k ovládání zařízení. Na konci kapitoly je uvedeno vybrané konstrukční řešení a očekávané parametry. Třetí kapitola je zaměřena na krokové motory, jejich rozdělení, vlastnosti a možnosti jejich řízení. Celkové elektrické zapojení zařízení, popis funkce jednotlivých obvodů a výběr napájecího zdroje je v kapitole čtyři. Součástí této kapitoly je stručný popis návrhu desek plošných spojů. Kapitola pět popisuje programovou část zařízení. Jsou zde popsány vytvořené knihovny v jazyce C, možnosti zadávání dat pro vrtání a celková koncepce programu včetně popisu menu stroje. Šestá kapitola krátce popisuje testování funkčnosti zařízení na zkušebních deskách, změření přesnosti a rychlosti vrtání. V závěru jsou shrnuty dosažené výsledky konstrukce celého zařízení. Přílohy této práce obsahují kompletní schémata zapojení, návrhy DPS, vybrané části zdrojového kódu, konstrukční výkresy krabice ovládacího panelu, 3D návrh stroje a fotodokumentaci.

# 1 CHARAKTERISTIKA CNC STROJŮ

Na rozdíl od klasických obráběcích strojů, které jsou ovládány ručně přes ruční kola, páky nebo mechanicky pomocí vaček jsou číslíkově řízené obráběcí stroje ovládány pomocí naprogramovaných příkazů v paměti přístroje, nebo na přenosném médiu. První číslíkově řízené stroje (NC – Numeric Control) byly vyráběny ve 40. a 50. letech 20. století. Na počátku výroba spočívala v přestavbě stávajících strojů, které byly doplněny polohovacími mechanismy. Stroj byl řízen instrukcemi uloženými na děrné pásce. Tyto prvotní mechanismy byly vylepšeny nejprve analogovými a poté digitálními počítači což vedlo ke vzniku počítačově řízených obráběcích strojů (CNC Computer Numeric Control).

U moderních systémů je výrobní proces automatizovaný pomocí CAD (Computer Aided Design) a CAM (Computer Aided Manufacturing) programů. Výstupem těchto programů je výpis instrukcí pro CNC stroj potřebný pro výrobu daného obrobku.

## 1.1 Vývojové stupně CNC strojů

Výroba CNC strojů prošel několika vývojovými etapami, které jsou označovány jako generace. Vývoj je možné rozdělit do následujících šesti generací (podle [1], [2]):

### 1. generace CNC strojů

Stroje první generace vycházejí z klasických ručně ovládaných strojů, kdy je původní mechanická část doplněna řídicími systémy. Instrukce jsou uloženy na děrných páskách, štítcích nebo na magnetické pásce. Stroje umožňují řízení v pravouhlých cyklech.

### 2. generace CNC strojů

Mechanická část strojů druhé generace je již upravena s ohledem na CNC řízení (revolverové hlavy, zásobníky nástrojů). Pro polohování jsou stroje vybaveny servosystémy. Řízení probíhá v obecných cyklech.

### 3. generace CNC strojů

Tyto stroje mají ještě více upravenou mechanickou část. Jsou zde použity velkoobjemové zásobníky nástrojů řízené počítačem, který řídí jak výměnu nástrojů, tak i případnou dopravu a upínání obrobků. K převodu rotačního pohybu motoru na lineární pohyb se používají kuličkové šrouby.

### 4. generace CNC strojů

Opotřebované nástroje jsou měněny automaticky. Výrobní proces je řízen adaptivně. Jsou sledovány výstupy obrábění (např. řezné síly, kvalita povrchu). Systém vyhodnotí

naměřená data a nastaví řezné podmínky pro optimální obrábění. U těchto strojů je využito progresivních metod v konstrukci a využití strojů (např. měření, kontrola a řízení pomocí laserových paprsků). Také zde začíná být řešena problematika okolních vlivů (teplota, prašnost, otřesy).

#### 5. generace CNC strojů

Začínají se uplatňovat mechatronické prvky. Je zde zavedeno měření obrobku během obrábění pomocí sond pro dodržení rozměrů a úchylek. Chyby polohování jsou elektricky kompenzovány.

#### 6. generace CNC strojů

Snižování času výměny nástrojů a obrobků. Vysokorychlostní víceosé obrábění, přesnost až desetiny mikrometrů. Stroje zhotovovány dle požadavků zákazníka.

## 1.2 Základní rozdělení CNC strojů

### 1.2.1 Rozdělení podle počtu současně řízených os

- Jednoosé obrábění (1D)  
Stroj vykonává pohyb pouze v jedné ose.
- Dvouosé obrábění (2D)  
Soustruhy - rotační pohyb a pohyb supportu ve dvou osách.  
Frézky – při najetí osou Z a následném frézování v osách X a Y (2,5D)
- Třiosé obrábění (3D)  
Pohyb obrobku v osách X, Y, Z, výroba prostorových tvarů.
- Víceosé obrábění (4D, 5D, ...)  
Standardní pravoúhlý systém os X, Y, Z doplněný o různý počet rotačních os.

### 1.2.2 Rozdělení podle způsobu řízení současně se pohybujícími os

#### Systémy s přetržitým řízením:

Mezi pohyby jednotlivých os neexistuje funkční závislost.

- Systém stavění souřadnic (polohování)  
Při pohybu nástroj neobrábí. K obrábění dojde až při dosažení požadované polohy. K nastavení požadovaných souřadnic může docházet postupně pro každou osu nebo najednou. Využívá se pro vrtací stroje.
- Systémy s pravoúhlým řízením  
K obrábění dochází při pohybu nástroje v jedné ose. Využívá se u jednodušších soustruhů a fréz.

**Systémy se souvislým řízením:**

Řídicí systém zajišťuje pohyb nástroje vůči obrobku plynule a současně alespoň ve dvou osách. Mezi pohyby jednotlivých os existuje funkční závislost, kterou zpracovává interpolátor a řídí pohyby os.

- Systémy s 2D řízením  
Nástroj vykonává lineární, rotační nebo kombinovaný pohyb ve dvou osách. Využití pro soustruhy a frézky.
- Systémy s 2,5D řízením  
Lineární interpolace v jedné rovině X-Y, Y-Z, Z-X.
- Systémy s 3D řízením  
Nástroj se pohybuje ve třech osách současně. Výpočet pohybu ve dvou osách v závislosti na ose třetí. Výroba libovolných obrysů a prostorových ploch.
- Systémy s 4D, 5D řízením  
Kromě pohybu v lineárních osách X, Y, Z může současně docházet k natáčení rotačních os.

### 1.3 Výhody a nevýhody CNC strojů

Výhody CNC [1]:

- Produktivnější a hospodárnější výroba.
- Vysoká kvalita a přesnost výrobků.
- Snadná změna programu a tím i tvaru obrobku (rychlé střídání dávek).
- Omezení chyb vzniklých lidským faktorem.
- Umožňují vyrábět obrobky, jejichž tvary jsou dány matematickou funkcí.
- Výrobní čas je dán programem a je téměř nezávislý na obsluze.
- Více výrobních operací na jedno upnutí obrobku.
- Maximální pružnost – příprava programu je oddělena od vlastního stroje, minimální výpadky výroby způsobené seřizováním.
- Nemusí se skladovat vyrobené díly, protože je lze snadno vyrobít pomocí uložených programů.

Nevýhody CNC [1]:

- Vysoká pořizovací cena strojů.
- Vysoká cena nářadí a nástrojů.
- Vyšší požadavky na kvalifikaci pracovníků provádějících seřizování, opravy, údržbu a programování strojů.
- Složitější příprava výroby.

## 2 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Při výrobě CNC vrtačky je nutné nejprve zvolit vhodnou koncepci stroje. Je možné si zvolit ze dvou základních mechanických konstrukcí:

### **CNC s pevným portálem:**

- Portál stroje je stacionární a jednu osu tvoří pohyblivý stůl.
- Tento typ konstrukce je vhodný pro obrábění drobných součástí, které nezatěžují stůl stroje. Nadměrným zatížením stolu by docházelo k velkému namáhání osy tvořené stolem.
- Výhodou je potřeba pouze jednoho pohyblivého elektrického přívodu a to k ose Z.
- Nevýhodou je nutnost většího prostoru pro pohyb pohyblivého stolu.
- Stroj s pevným portálem je zobrazen na obr. 2.1 vlevo.

### **CNC s pohyblivým portálem:**

- Portál stroje se pohybuje nad stacionárním stolem.
- Konstrukce je vhodná pro výrobu součástí větších obrobků. Váha výrobku nemá vliv na pohyblivost osy X jako u předchozí kategorie.
- Výhodou je větší zatížitelnost stolu a menší potřebný prostor pro stroj.
- Nevýhodou tohoto typu konstrukce je nutnost řešení pohyblivých přívodu jak k ose Z, tak k ose Y.
- Stroj s pohyblivým portálem je zobrazen na obr. 2.1 vpravo.



Obr. 2.1 CNC s pevným a pohyblivým portálem (Převzato z [3]).



## 2.1 Lineární vedení

Základem každého posuvu jsou vodící plochy. Provedení, druh a kvalita vodících ploch má vliv na výslednou přesnost celého zařízení. Největším problémem při konstrukci je tření styčných ploch. Součinitel tření by měl být co nejmenší a stejně velký v celém rozsahu rychlostí pojezdu. Tím jsou omezeny trhavé pohyby při rozjezdu. Pro omezení otřesů a trhání je další důležitou vlastností velká tuhost a omezení vůlí ve vedení. Při návrhu a konstrukci je potřeba brát v úvahu délku zdvihu, hmotnost, kterou vedení ponese a síly působící na pojezd při obrábění.

### 2.1.1 Druhy vedení pro CNC stroje

Nejčastěji používanými druhy vedení pro CNC stroje podle [1]:

- Vedení kluzná
- Vedení valivá
- Vedení hydrostatická
- Vedení servostatická
- Vedení aerostatická
- Vedení kombinovaná

#### **Vedení kluzná:**

Tento druh vedení může být tvořen rovinnými, prizmatickými nebo kruhovými styčnými plochami pevné a pohyblivé části stroje. Po omezení tření jsou plochy mazány olejem. Znakem těchto vedení je nízká cena, jednoduchá konstrukce a údržba. Nevýhodou je nerovnoměrné tření pro různé rychlosti posuvu a možnost vzniku vůlí. Vhodným materiálem pro konstrukci styčných ploch je litina, bronz, teflon.

#### **Vedení valivá:**

Valivá vedení mají mnohem menší tření, než vedení kluzná. Je to způsobeno přidáním valivých těles mezi styčné plochy. Tělíška mohou být např. kuličková, válečková nebo jehlová. Za cenu vyšší ceny, náročnosti výroby a konstrukce je výhodou nižší opotřebení, pohyb bez vůlí a stejnoměrný součinitel tření.

### 2.1.2 Vybraná konstrukční řešení lineárních posuvů

#### **Nepodepřené tyče**

Tento druh posuvu může být konstruován jako kluzný nebo jako valivý. Základem pro oba druhy je broušená povrchově kalená tyč (obr. 2.2 vlevo). Při konstrukci kluzného vedení je vozík posuvu vybaven kluzným pouzdem (obr. 2.2 uprostřed), zatímco u valivé konstrukce je použito valivého pouzdra – lineární ložisko (obr. 2.2 vpravo). Nevýhodou této nejlevnější varianty konstrukce posuvů je menší tuhost, proto je používána pro krátké posuvy.



Obr. 2.2 Komponenty pro vedení s nepodepřenou tyčí (Převzato z [4], [5], [6]).

### **Podepřené tyče**

Tento druh posuvu vychází z konstrukce nepodepřených tyčí a může být také konstruován jako kluzný nebo jako valivý. Pro zvýšení tuhosti posuvu je vodící tyč po celé délce podepřena (obr. 2.3 vlevo). Díky tomu lze tento systém využít pro delší posuvy. Pouzdra musí být kvůli podpěře otevřená, ale princip je totožný s nepodepřenou tyčí (obr. 2.3).



Obr. 2.3 Komponenty pro vedení s podepřenou tyčí (Převzato z [4], [5], [7]).

### **Prizmatické vedení**

Prizmatické vedení umožňuje velmi přesné přímočaré pohyby s nízkým a konstantním součinitelem tření. Toho je dosaženo pomocí kuliček obíhajících v broušených a kalených drahách vozíku (obr. 2.4 vlevo) a kolejnice (obr. 2.4 vpravo).



Obr. 2.4 Kolejnice a vozík pro prizmatické vedení (Převzato z [4]).

## 2.2 Pohybový mechanismus lineárních vedení

Při konstrukci stroje může být pojezdový vozík každého z posuvů uváděn do pohybu pomocí lineárního elektromotoru. Běžnější a dostupnější jsou však motory rotační a proto je potřeba převést rotační pohyb motoru na lineární pohyb pojezdového vozíku. Základními požadavky při převodu pohybu je velká tuhost a minimální vůle při změně otáček motoru. Nejčastěji jsou používána následující mechanická uspořádání:

### Trapézové šrouby a matice

Asi nejběžnějším způsobem pro transformaci pohybu je trapézový (lichoběžníkový) šroub a matice (obr. 2.5). Hlavní výhodou je nízká cena. Nevýhodou je vůle v závitu při změně otáček, valivé tření a následné opotřebení šroubu. Nevýhoda vůle v závitu se dá vyřešit použitím dvou matic, které se vůči sobě zapnou a každá působí na jednu stranu závitu.



Obr. 2.5 Trapézový šroub a matice (Převzato z [8]).

### Kuličkové šrouby a matice

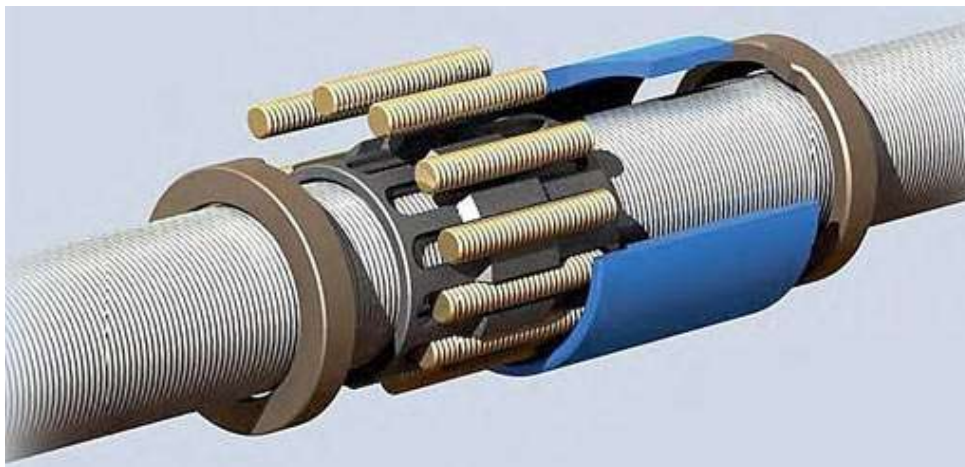
V současné době je nejčastějším způsobem transformace rotačního pohybu na lineární použití kuličkového šroubu a matice (obr. 2.6 vlevo). Ve srovnání s trapézovým šroubem je zde menší tření a tím i menší opotřebování. Princip je založen na odvalování kuliček vložených do závitu mezi šroub a matice. Dochází zde k menšímu opotřebení díky valivému tření. Výhodami je možnost eliminovat vůle díky předeptnutí dvou matic na společném šroubu. Nevýhodou je složitost a obtížnost výroby. Při odvalování se musí kuličky vracet kanálkem z konce matice zpět na začátek závitu (obr. 2.6 vpravo).



Obr. 2.6 Trapézový šroub a matice, princip vracení kuliček (Převzato z [9]).

### Válečkový šroub

Válečkové šrouby jsou obdobou kuličkových šroubů. Výhodou válečkových šroubů (obr. 2.7) je velký počet dotykových bodů mezi maticí a šroubem, které nesou zatížení. Závitové válečky plní funkci ložiska a rozdělují zatížení do mnoha bodů. Tyto šrouby lze vyrábět s mnohem menším stoupáním a dovolují použít dvojnásobné otáčky proti kuličkovým šroubům [12].



Obr. 2.7 Konstrukce válečkového šroubu (Převzato z [13]).

### Pastorek a ozubený hřeben

Tento způsob posuvu je vhodný pro delší dráhy a vyšší rychlost posuvu (menší převod, než u šroubu). Nevýhodou je menší tuhost a vůle mezi pastorkem a hřebem. Tu lze vymežit mechanickou pružinou nebo použitím dvou motorů. Převody mohou mít buď přímé (obr. 2.8 vlevo) nebo šikmé ozubení (obr. 2.8 vpravo).



Obr. 2.8 Převod s přímým a šikmým ozubením (Převzato z [10] a [11]).

## 2.3 Servopohony

Pro aplikaci v CNC strojích je potřeba pohonu, u kterého lze nastavit přesnou polohu osy. Podle aplikace můžou pracovat jak ve vysokých, tak i v nízkých otáčkách. Pro tyto aplikace je vhodné použít servopohon.

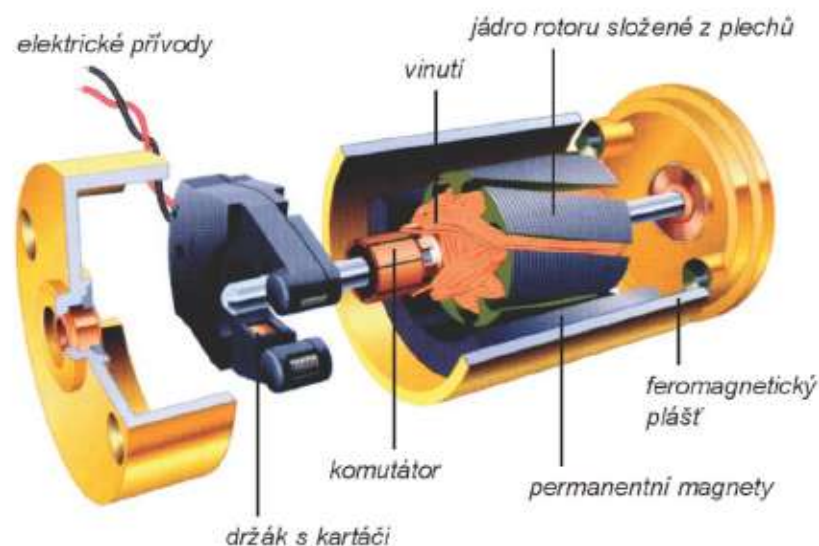
Servopohon je tvořen elektromotorem, regulátorem otáček nebo polohy a snímačem rychlosti respektive polohy. Napájení může být přímé, nebo přes polovodičový měnič. Podle druhu snímače dělíme servopohony na rychlostní (zpětná vazba ze snímače rychlosti) a polohové (zpětná vazba ze snímače polohy). V této kapitole bude představeno několik druhů motorů využívaných pro servopohony.

### Servomotory lze rozdělit podle principu:

- Stejnosměrné servomotory
- Střídavé servomotory
  - asynchronní
  - synchronní

### Stejnosměrné motory

Stejnosměrný motor (obr. 2.9) je ideálním motorem pro regulaci – otáčky motoru lze měnit změnou velikosti přiváděného napětí. Aktivními částmi stejnosměrného motoru jsou stator a rotor. Stator tvoří permanentní magnety a pólové nástavce z magneticky měkké oceli. Ty koncentrují magnetický tok ve vzduchové mezeře. Rotor je drážkovaný a jednotlivé cívky připojené ke komutátoru jsou uloženy v těchto drážkách. Komutátor spolu s uhlíkovými kartáči a kartáčovými držáky tvoří sběrací ústrojí [14]. Nevýhodou je nutná údržba sběracího ústrojí a jiskření vznikající v okolí komutátoru.

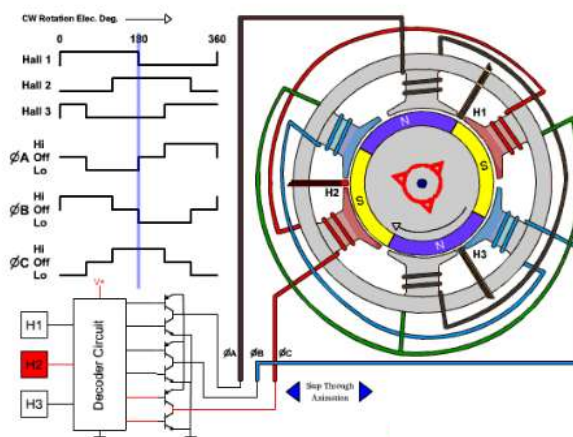


Obr. 2.9 Řez stejnosměrným motorem (Převzato z [15]).



## Stejnoseměrné elektronicky komutované motory

Jedná se v podstatě o „obrácený“ stejnosměrný motor. Na rozdíl od klasického stejnosměrného motoru, kde je stator tvořen permanentním magnetem a rotor vinutím, elektronicky komutovaný motor má magnety na rotoru a vinutí na statoru. Funkci mechanického komutátoru přebírá řídicí elektronika, která podle polohy rotoru přepíná proud do jednotlivých vinutí. Poloha rotoru je zjišťována pomocí třech Hallových sond pootočených vůči sobě o  $120^\circ$  [14]. Princip elektronicky komutovaného motoru, i s průběhy napětí z Hallových sond jednotlivých vinutí, je patrný z obr. 2.10.



Obr. 2.10 Řez a průběhy napětí při řízení elektronicky komutovaného motoru (Převzato z [16]).

## Asynchronní motory

Tento typ motorů je nejpoužívanějším typem pro pohon pracovních strojů a to hlavně v provedení s rotorem nakrátko. Součástí statoru je statorové vinutí, které lze zapojit buď do hvězdy, nebo do trojúhelníku. Rotor může být klecový (hliníkové nebo měděné tyče na koncích spojené kruhovými čely nakrátko) nebo kroužkový (vinutí z izolovaného vodiče uložené v rotorových drážkách připojené na rotorové sběrací kroužky). Otáčky lze regulovat přepínáním počtu pólů asynchronního motoru nebo změnou napájecí frekvence [14]. Tento typ pohonu je vhodný pro větší stroje.

## Synchronní motory

Rotor se otáčí synchronně s otáčením točivého magnetického pole. Stator je shodný se statorem asynchronních motorů. Rotor může být hladký nebo vyjádřený póly. Ty mohou být opatřeny budícím vinutím napájeným stejnosměrným proudem. Stejnoseměrný proud je do vinutí přiveden pomocí kluzných kontaktů nebo bezkontaktně rotačním transformátorem doplněným o usměrňovač. Pro servopohony jsou používány motory buzené pomocí permanentních magnetů na rotoru. Konstrukce takového motoru se podobá elektronicky komutovanému stejnosměrnému motoru. Budící magnety můžou být v rotoru buď zapuštěné, nebo jsou na povrchu rotoru. Motory pro servopohony pracují v synchronním režimu, který je podmíněn zpětnou vazbou určující polohu rotoru. Na rozdíl od elektronicky komutovaných motorů, kde stačí diskretní snímání polohy (informace po  $60^\circ$ ) je zde potřeba přesná poloha rotoru. Oproti asynchronním motorům jsou menší a lehčí při stejném výkonu a lépe se chladí. Ve srovnání s elektronicky komutovaným motorem zde nedochází k momentovým pulzacím [14]. Jedná se o velmi rozšířený typ motoru pro polohové servomechanismy.

## Krokové motory

Krokový motor (obr. 2.11) je nejjednodušším akčním členem pro převod digitálního signálu na polohu – úhel natočení [14], [17]. Jedná se v principu o synchronní stroj, v němž je postupným napájením pólových dvojic generováno „poskakující“ magnetické pole. Pohyb rotoru je při nízkých rychlostech nespojitý – mezi stabilními polohami se rotor pohybuje v krocích. Počet těchto kroků je dán konstrukcí motoru a také způsobem řízení motoru. K ovládání těchto motorů je vždy potřebná elektronika. Zajistíme-li, že každý požadovaný krok je motorem vykonán, může pohon s krokovým motorem nastavovat polohu bez zpětné vazby o aktuální poloze. Typické použití těchto motorů je např. v počítačových perifériích, robotice nebo u polohovacích strojů. Nevýhodou krokových motorů je možnost ztráty kroku při velkém zatížení a možnost zakmitávání strojů při krokování. Obě nevýhody se dají odstranit správným typem motoru a způsobem řízení. Výhodou je velká životnost motoru. Rozdělení a způsoby řízení krokových motorů budou uvedeny v následující kapitole.



Obr. 2.11 Krokový motor NEMA23 (Převzato z [4]).

## 2.4 Zvolená konstrukce

Při návrhu a výrobě stroje byl kladen důraz na nízkou cenu a jednoduchost stroje. Všechny díly jsou navrženy a vyrobeny s ohledem na vybavení domácí dílny.

### 2.4.1 Požadavky a zvolená koncepce stroje

Jak již bylo uvedeno, stroj by měl být schopen vrtat DPS až do velikosti formátu A4 při dostatečné přesnosti (alespoň 0,1 mm). Při výběru koncepce byla vybrána konstrukce s pohyblivým portálem. Tento typ konstrukce je sice náročnější na výrobu a tuhost stroje, ale výhodou je menší potřebný prostor při pohybu stroje. Pro inspiraci při výrobě bylo použito hotových strojů dostupných např. z [3], [4].

Jako vhodný typ materiálu pro rám vrtačky byl zvolen dural. Výhodou duralu je vysoká pevnost při malé hmotnosti a relativně snadná opracovatelnost. Pro některé funkční části stroje však tento materiál vhodný není a proto je pro lineární vedení a pohybový mechanismus použita ocel. Výsledkem návrhu je vrtačka na (obr. 2.12).



Obr. 2.12 Výsledné konstrukční řešení CNC stroje.

#### 2.4.2 Pohon a uspořádání lineární osy

Pro zajištění pohybu lineárních os bylo pro nízkou cenu a jednoduchost vybráno vedení s nepodepřenou tyčí a kluznými pouzdry. Tento typ vedení má hlavní nevýhodu v malé tuhosti. Pro konstrukci malého CNC je však tuhost plně postačující. Pro osy X a Y mají vodící tyče průměr 18 mm a pro osu Z průměr 12 mm.

Pro pohon byly zvoleny krokové motory. Protože jsou motory v provedení bez rotačních kodérů pro snímání polohy kvůli zpětné vazbě, byl při výběru kladen důraz na dostatečnou sílu motoru. Jako vhodný typ byly vybrány motory NEMA23 s krouticím momentem 1,89 Nm. Vybraný motor má velikost kroku  $1,8^\circ$  (200 kroků na otáčku) a maximální rychlost je 2500 kroků/s (12,5 otáčky/s).

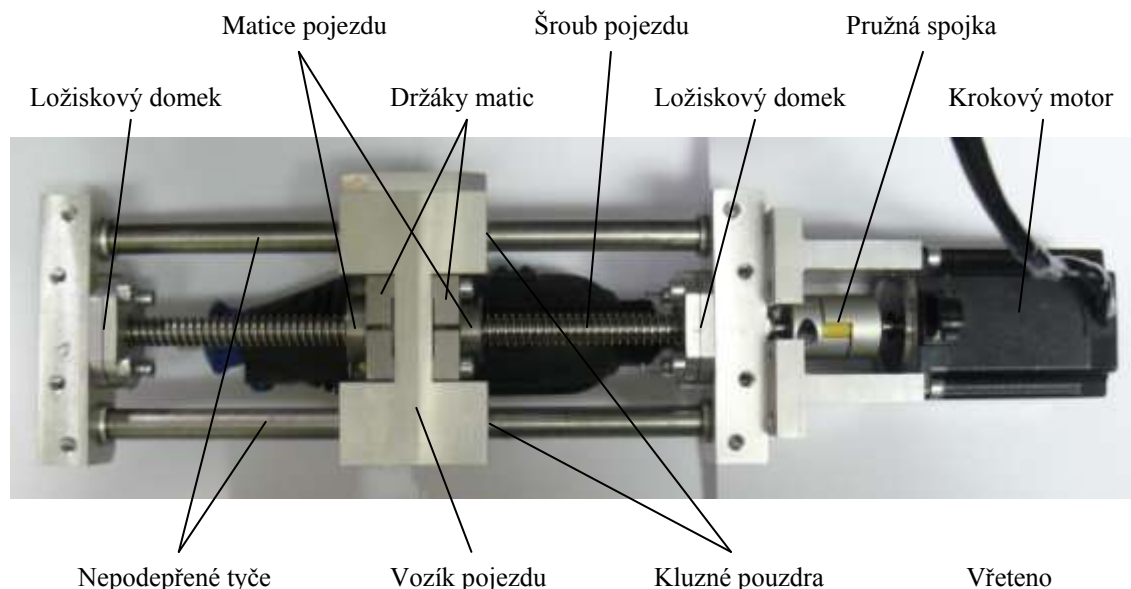


Převod rotačního pohybu na lineární je uskutečněn pomocí trapézových šroubů. Pro osu X a Y je použit šroub Tr 14x4 mm a pro osu Z Tr 12x3 mm. Pro každou osu jsou použity dvě matice, které jsou vůči sobě pootočené a zapřeny tak, aby každá dosedala na závit z jiné strany. Tím je odstraněna axiální vůle v závitě při změně otáček motoru. Šroub je na každé straně uložen ve dvou radiálních ložiscích, která jsou nalisována v ložiskových domech. Pro vymezení axiálního pohybu šroubu v celém uložení, je šroub na straně s motorem axiálně vymezen maticí. Spojení trapézového šroubu a krokového motoru je uskutečněno pomocí pružné spojky.

Níže uvedená tab. 2.1 shrnuje konstrukční parametry všech os. Konstrukční uspořádání posuvu osy Z je na obr. 2.13.

Tab. 2.1 Základní parametry jednotlivých os.

Osa		X	Y	Z
Požadovaný rozsah pojezdu	[mm]	210	297	50
Skutečný rozsah pojezdu	[mm]	204	295	155
Teoretická max. rychlost	[mm/s]	50	50	37,5
Dělení os (jeden krok)	[mm]	0,02	0,02	0,015
Průměr vodičích tyčí	[mm]	18	18	12
Typ šroubu a matic	[-]	Tr 14x4	Tr 14x4	Tr 12x3



Obr. 2.13 Konstrukční řešení osy Z.

### 2.4.3 Obráběcí stůl

Stůl stroje je tvořen 4 mm tlustým duralovým plechem o rozměru 315 x 492 mm. K tomuto plechu je přišroubována plotna z dřevotřísky o tloušťce 16 mm. Pro upínání obrobku (DPS) jsou do dřevotřísky po celé délce zapuštěny čtyři hliníkové lišty s T drážkou. Upnutí obrobku je provedeno pomocí šroubů M5 a upínek. Po krajích stolu jsou upevněny plechy chránící pojezdové tyče osy X. Čelní pohled na řešení pracovního stolu je na obr. 2.14.



Obr. 2.14 Boční pohled na obráběcí stůl.

### 2.4.4 Vřeteno

Jako vřeteno byla zvolena přímá bruska firmy FERM a to typ FCT-160F (CTM1010) (obr. 2.15). Bruska má výkon 160 W a rozsah otáček 15000 – 35000 ot/min. Regulace je zatím pouze manuální na těle brusky a spínání je realizováno pomocí relé. Do budoucna se však počítá se softwarovou regulací a volbou otáček při zadávání souřadnic. Program pro řídicí procesor ARM je psán s ohledem na toto budoucí řešení. Bude tedy nutné doplnit pouze elektronický regulátor.



Obr. 2.15 Přímá bruska FERM.

### 2.4.5 Výroba stroje

Jak již bylo řečeno, hlavním kritériem při výrobě byla nízká cena. Proto nebyly na vrtačku použity žádné hotové komerčně dostupné díly (kromě krokových motorů, pružných spojek, ložisek a vřetena). Vše je vyrobeno z běžně dostupného neopracovaného materiálu. Veškeré strojní opracování bylo provedeno svépomocí na frézce F2/25, soustruhu TOS Žebrák S28, strojní pile Pilous ARG200 PLUS a sloupové vrtačce PROMA B1316 B/400. Spojení všech dílů je provedeno metrickými šrouby M3 – M14.

Výsledná vrtačka je složena asi ze sta stejně opracovaných dílů. Díly byly vyráběny podle hrubých náčrtů na papír, a proto neexistuje žádná relevantní dokumentace. Jelikož hlavním úkolem této práce bylo navrhnout elektronickou a programovou část, nebylo možné kompletní dokumentaci stroje z časových důvodů zhotovit.

## 3 KROKOVÉ MOTORY

Krokové motory jsou nejjednodušším akčním členem, který umožňuje převést digitální informaci na mechanický pohyb – úhel natočení rotoru. Jak již bylo řečeno, princip krokového motoru je možné přirovnat k synchronnímu motoru. Na rozdíl od synchronních strojů kde je točivé magnetické pole generováno třífázovým proudem ve statorovém vinutí, je u krokových motorů využito „poskakující“ magnetické pole, které vzniká střídavým napájením pólových dvojic stejnosměrným proudem. Směr otáčení motoru je dán pořadím přepínání vinutí. Počet stabilních poloh (kroků) je dán typem a konstrukcí motoru [17], [18].

K uvedení tohoto motoru do pohybu je nutné doplnit motor o řídicí elektroniku, která se stará o přepínání napájení jednotlivých vinutí na pólových nástavcích. Změnou způsobu řízení je možné změnit velikost kroku a tím i počet kroků pro jednu otáčku rotoru.

V této kapitole budou popsány tři typy krokových motorů lišících se konstrukčním uspořádáním. Také zde budou rozebrány základní způsoby řízení krokových motorů.

### 3.1 Konstrukce krokových motorů

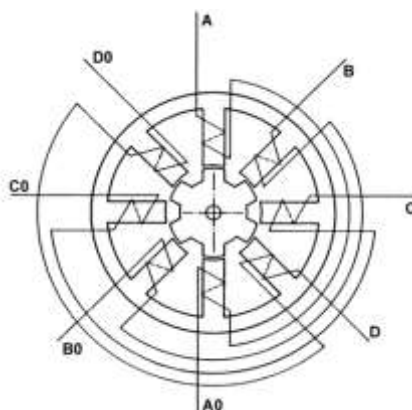
Podle konstrukce rozdělujeme krokové motory na [17], [18]:

- Krokové motory s pasivním rotorem (reluktanční motory).
- Krokové motory s aktivním motorem.
- Lineární krokové motory.

#### 3.1.1 Krokový motor s pasivním rotorem

Tyto motory jsou někdy označovány jako reakční nebo reluktanční. Obr. 3.1 zachycuje konstrukci tohoto motoru s velikostí kroku  $15^\circ$ . Rotor má šest pólových nástavců a nemá žádné vinutí. Může být vyroben buď z jednoho kusu ocele, nebo je tvořen svazkem plechů nalisovaných na hřídeli. Stator je tvořen svazkem ocelových plechů s osmi pólovými nástavci. Tyto nástavce mají stejnou šířku, jako rotorové. Vzdálenost mezi nástavci statoru a rotoru je velmi malá (0,02 – 0,20 mm). Na statorových nástavcích jsou navinuty cívky. Dvojice cívek na protilehlých stranách tvoří jednu fázi motoru. Elektronické obvody se starají o přepínání proudu do jednotlivých fází.

Vlastnosti krokového motoru (velikost kroku, provozní moment a provozní kmitočet) lze výrazně ovlivnit způsobem řízení. V následující podkapitole budou uvedeny tři typy řízení používané v praxi.



Obr. 3.1 Konstrukce krokového motoru s pasivním rotorem (Převzato z [17]).

### 3.1.2 Krokový motor s aktivním rotorem

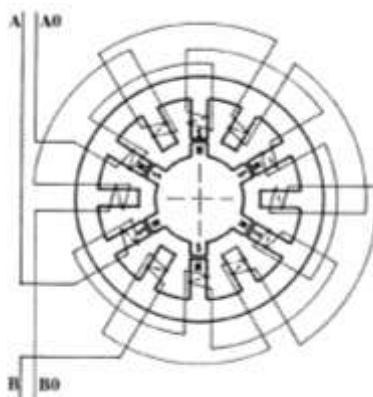
U těchto krokových motorů obsahuje rotor permanentní magnet. Rozlišujeme dva typy motorů s aktivním rotorem [17].

- Motory s radiálně polarizovaným permanentním magnetem.
- Motory s axiálně polarizovaným permanentním magnetem (hybridní).

#### Krokový motor s radiálně polarizovaným magnetem

Rotor tohoto motoru je tvořen permanentním magnetem a pólovými nástavci. Po odvodu se střídají severní a jižní póly. Stator tvoří dvojnásobek pólových nástavců jako rotor. Tento počet musí být také dělitelný čtyřmi. Vinutí je dvoufázové (vinutí na nástavcích jsou střídavě připojeny k fázi A a B). Při natáčení motoru je potřeba přepínat mezi vinutími, ale také měnit směr proudu ve vinutích. Řez motoru je zobrazen na obr. 3.2.

Nevýhodou těchto motorů je složitější magnetický obvod a tím i cena. Provozní moment je pouze několik Nm, velikost kroku min.  $15^\circ$ . Výhodou je malá časová konstanta díky permanentnímu magnetu. Díky tomu je možné dosáhnout vyšších provozních kmitočtů, než u motorů s pasivním rotorem.



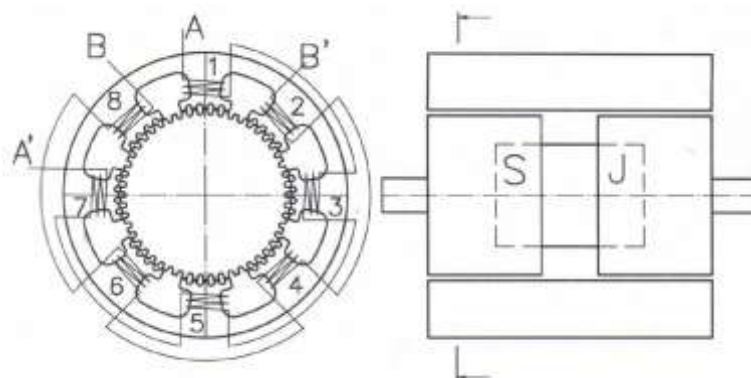
Obr. 3.2 Motor s radiálně polarizovaným magnetem (Převzato z [17]).

### Krokový motor s axiálně polarizovaným magnetem

V současné době asi nejpoužívanější typ motoru, někdy označován jako hybridní motor (obr. 3.3). Rotor (obr. 3.4 vpravo) tvoří nemagnetická hřídel a dva pólové nástavce složené z plechů, mezi kterými je uložen axiálně polarizovaný permanentní magnet. Každý pólový nástavec má tedy jinou magnetickou polaritu. Rotorové nástavce mají po obvodu zuby, jejichž počet určuje velikost kroku motoru (např. 50 zubů pro 200 kroků na otáčku a velikost kroku  $1,8^\circ$ ). Rotorové nástavce jsou vůči sobě natočeny o polovinu zubové rozteče (proti zubům jednoho nástavce jsou drážky druhého nástavce). Stator (obr. 3.4 vlevo) tvoří osm pólů s drážkováním (pólový nástavec má obvykle osm zubů). Počty drážek statoru a rotoru jsou různé (obvykle je počet drážek rotoru větší). Na pólových nástavcích statoru jsou navinuty cívky. Osm cívek je zapojeno jako dvoufázové vinutí. Cívky na pólových nástavcích 1, 3, 5 a 7 tvoří fázi A a cívky na nástavcích 2, 4, 6 a 8 tvoří fázi B.

Fáze vinutí tohoto motoru jsou buzeny v předepsaném pořadí a tím vzniká statorové magnetické pole. Rotor sleduje toto magnetické pole tak, že se vždy nejbližší zuby rotoru nastaví do magneticky klidové polohy. Pokud proud neprotéká žádným vinutím, tvoří magnetický tok jen permanentní magnet. Rotor je tímto magnetickým polem aretován v určité klidové poloze. Podle požadovaného smyslu otáčení motoru je nutné jak přepínání vinutí, tak i změna smyslu protékání proudu. Tento způsob řízení se nazývá dvoufázový s bipolárním napájením. Možnosti změny směru proudu vinutí budou popsány v jedné z následujících podkapitol. Kromě nejrozšířenějšího dvoufázového typu existují i vícefázové hybridní krokové motory. Ty se vyznačují větším počtem kroků na otáčku, ale také nutností použití složitějších budících obvodů.

Typická velikost kroku těchto motorů je  $0,36^\circ$  až  $5^\circ$ . Provozní moment je jednotky až desítky Nm a provozní kmitočet jednotky až desítky kHz.



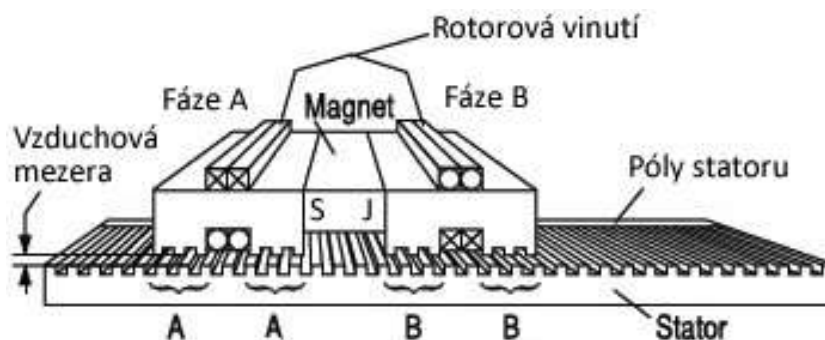
Obr. 3.3 Motor s axiálně polarizovaným magnetem (Převzato z [18]).



Obr. 3.4 Stator a rotor hybridního krokového motoru (Převzato z [19]).

### 3.1.3 Lineární krokový motor

Při konstrukci tohoto druhu motoru (obr. 3.5) byl rotor změněn na stacionární ozubenou přímou dráhu a stator na pohyblivou část, která se pohybuje po dráze. Použití lineárních motorů je ve srovnání s rotačními nákladné a vyžaduje velmi čisté a bezprašné prostředí [20].



Obr. 3.5 Lineární krokový motor (Převzato z [20]).

## 3.2 Způsoby řízení krokových motorů

Existuje několik druhů řízení krokových motorů. Ne každý způsob lze však použít pro všechny druhy motorů. Volba řízení závisí na očekávaných parametrech, jako jsou velikost kroku, krouticí moment, pracovní kmitočet (rychlost otáčení), proudový odběr. Záleží také na vnitřním zapojení vinutí motoru. V této kapitole budou popsány různé způsoby zapojení a řízení hybridního krokového motoru.

Podle způsobu napájení se v praxi můžeme setkat se dvěma typy řízení krokových motorů, a to s unipolárním a bipolárním. Zvýšení statického momentu lze dosáhnout volbou jednofázového nebo dvoufázového řízení. Velikost kroku lze ovlivnit výběrem čtyřtaktního nebo osmitaktního řízení.

Kvůli přechodovým magnetickým jevům je rychlost otáčení motoru omezena. Mezní rychlost je dána typem motoru a dosahuje řádu stovek kroků za sekundu. Při překročení této mezní rychlosti nebo při velkém zatížení začne motor ztrácet kroky.

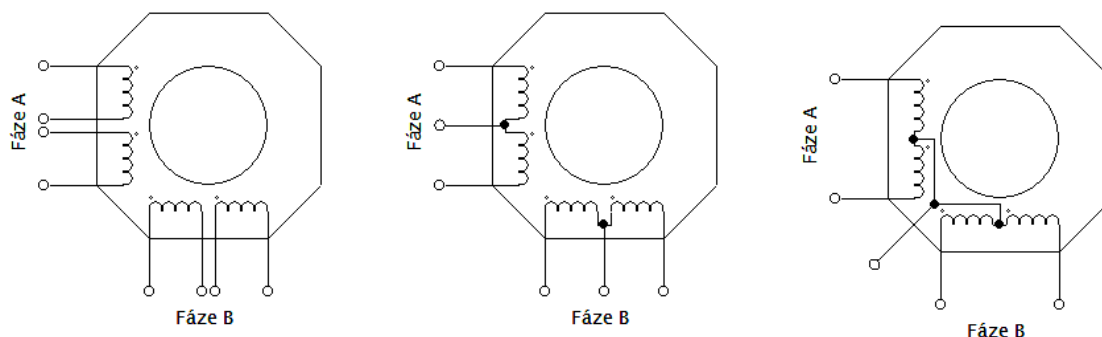
### 3.2.1 Unipolární a bipolární řízení

#### Unipolární řízení

Při unipolárním řízení prochází proud vždy jen jednou cívkou dané fáze. Motor má menší spotřebu, ale také krouticí moment je menší. Výhodou je jednoduché zapojení. Stačí jeden spínací prvek pro každou cívku motoru.

Rozdělíme-li každou fázi na dvě části, je možné měnit směr magnetického toku bez potřeby H-můstku nebo symetrického zdroje jako u bipolárního řízení. Podle toho, jak jsou jednotlivé konce vinutí dvoufázového motoru vyvedeny vně motoru, může mít motor:

- Osm vodičů (každá polovina fáze je vyvedena samostatně, obr. 3.6 vlevo).
- Šest vodičů (každá fáze má vyvedený střed vinutí, obr. 3.6 uprostřed).
- Pět vodičů (střed vinutí obou fází jsou spojeny, obr. 3.6 vpravo).



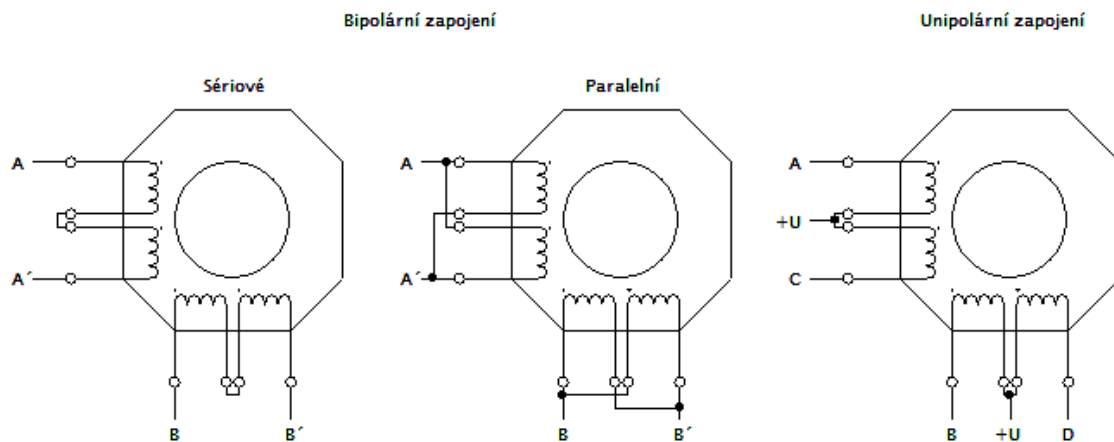
Obr. 3.6 Způsoby zapojení vinutí dvoufázového krokového motoru (Převzato z [18]).

### Bipolární řízení

U bipolárního řízení protéká proud vždy dvojicí protilehlých cívek (fází motoru), které jsou zapojeny uvnitř motoru tak, aby vytvářely magnetické pole s opačnou orientací. Řízení musí umožnit změnu směru budícího proudu v jednotlivých vinutích a tím i změnu směru magnetického toku. Toho lze docílit těmito způsoby:

- Bifilárním vinutím (poté stačí použít jednoduché spínací prvky).
- Použitím H-můstku při napájení z nesymetrického zdroje.
- Použitím symetrického zdroje a jednoduchých spínacích prvků.

Máme-li k dispozici motor s osmi vývody je možné jednotlivé poloviny fáze zapojit sériově (obr. 3.7 vlevo) nebo paralelně (obr. 3.7 uprostřed). Při sériovém zapojení je výsledný odpor a indukčnost každé fáze čtyřnásobná proti paralelnímu zapojení. To má za následek zvýšení momentu při nižších rychlostech (nižší frekvenci krokování). Naopak paralelní zapojení dosahuje vyšších hodnot momentu ve vyšších rychlostech.



Obr. 3.7 Bipolární a unipolární buzení hybridního krokového motoru (Převzato z [18]).



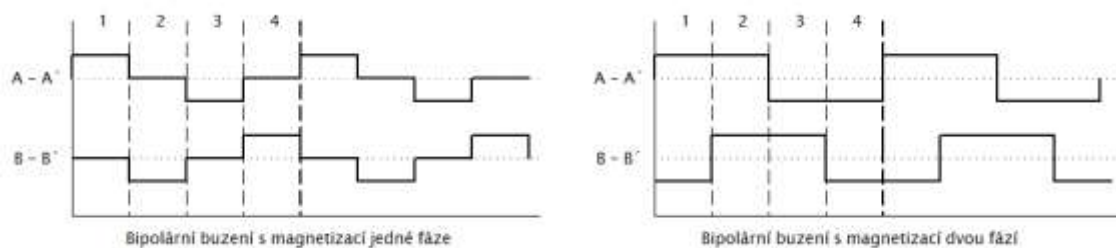
### 3.2.2 Jednofázové a dvoufázové řízení

#### Jednofázové řízení

Magnetické pole v motoru je v jednom okamžiku generováno pouze jednou cívkou (unipolární buzení) nebo dvojicí protilehlých cívek (bipolární buzení). Magneticky klidová poloha nejbližšího zubu rotorového nástavce je proti statorovému pólu buzené cívky. Průběhy napětí takto buzeného dvoufázového hybridního motoru jsou na obr. 3.8 vlevo. Výhodou je menší spotřeba za cenu nižšího statického vazebního momentu.

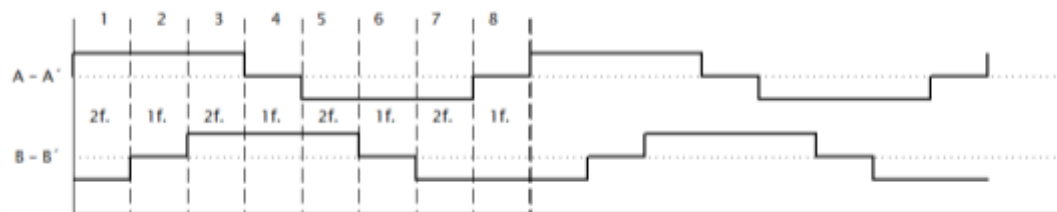
#### Dvoufázové řízení

Magnetické pole je generováno dvojicí sousedních cívek (dvou dvojic cívek). Magneticky klidová poloha nejbližšího zubu rotorového nástavce je v geometrickém středu nástavců statoru, na kterých jsou právě buzené cívky. Výhodou je vyšší statický vazební moment (asi 1,9x vyšší než u jednofázového buzení) a vyšší strmost momentové charakteristiky, což dovoluje dosáhnout vyšších krokovacích frekvencí. Kvůli současnému napájení dvou cívek je spotřeba proti jednofázovému buzení dvojnásobná. Průběhy napětí pro dvoufázový hybridní motor jsou na obr. 3.8 vpravo.



Obr. 3.8 Čtyřtaktní řízení s bipolárním buzením jedné a dvou fází dvoufázového hybridního krokového motoru (Převzato z [18]).

Jak je patrné z obr. 3.8 pro oba způsoby buzení existují čtyři různé kombinace sepnutí fází. Jedná se tedy o čtyřtaktní řízení motoru, kdy motor pracuje s plným krokem (počet kroků je dán konstrukcí motoru). Chceme-li dosáhnout polovičního kroku, je možné použít osmitaktí řízení. To střídavě využívá jednofázové a dvoufázové buzení. Výhodou tohoto řízení je dvojnásobný počet kroků na otáčku bez úprav budících obvodů. Nevýhodnou vlastností je proměnlivý statický moment, který je jiný pro jednofázové a dvoufázové buzení. To lze odstranit řídicími obvody, kdy se při dvoufázovém buzení omezí proud fází. Dosáhneme tedy momentu odpovídajícímu jednofázovému buzení. Průběhy napětí pro osmitaktí řízení jsou na obr. 3.9.



Obr. 3.9 Osmitaktní řízení s bipolárním buzením dvoufázového hybridního krokového motoru.

### 3.2.3 Mikrokování

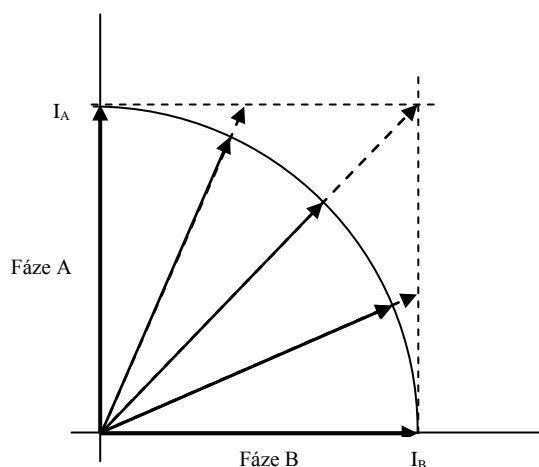
V některých aplikacích je vyžadováno velice jemné rozlišení polohy krokového motoru (zlomky stupně) nebo je potřeba omezit rázy vznikající při polohování hřídele [18].

Úhel kroku je možné změnit mechanickou konstrukcí při výrobě a to zvětšením počtu fází nebo vyšším počtem zubů na rotorových nástavcích. Nevýhodou vyššího počtu fází je velká složitost řídicích obvodů (v praxi se nevyplácí pracovat s počtem fází větší jak čtyři). Vyšší počet rotorových zubů je nevýhodný z hlediska složitosti výroby a tím i vyšších nákladů (krokové motory s krokem pod  $1^\circ$  jsou výjimkou). Existuje však způsob řízení motorů, který rozdělí základní krok motoru na více mikrokroků.

Tento způsob řízení se opírá o metodu řízení dvou fází. Rozdíl je v tom, že u mikrokování jsou jednotlivé fáze buzeny různě velkými proudy rozdílnými pro jednotlivé mikrokroky. Vhodnou volbou a řízením vzájemných velikostí proudů je možné dosáhnout rovnovážné polohy mikrokroku kdekoli mezi dvěma sousedními základními kroky (určeno poměrem proudů) a také stejného, případně různého momentu (dané velikostí proudů). V tab. 3.1 jsou uvedeny velikosti proudů pro napájení jednotlivých fází při rozdělení kroku na čtyři mikrokroky. Velikost momentu bude v tomto zjednodušeném případě různá. Vektory proudů jsou zobrazeny na obr. 3.10. Čárkovaně zakreslené vektory proudů způsobí různě velký moment a vektory plnou čarou zajistí stejný moment ve všech mikrokrocích.

Tab. 3.1 Proudby jednotlivými fázemi motoru při mikrokování (Převzato z [18]).

Poloha mikrokroku	Proud Fáze 1	Proud Fáze 2
0	I	0
1/4	I	$k \cdot I$
1/2	I	I
3/4	$k \cdot I$	I
1	0	I



Obr. 3.10 Proudby jednotlivými fázemi motoru při mikrokování (Převzato z [18]).

Pro realizaci mikrokrokování se čtyřmi mikrokroky je potřeba dvouhladinový napájecí zdroj (hodnoty  $I$  a  $k \cdot I$ ). Při použití více mikrokroků jsou vyšší nároky na řídicí obvody a zdroj. V současné době umožňuje mikrokrokování většina obvodů určených pro řízení krokových motorů a to při zachování malých požadavků na zdroj.

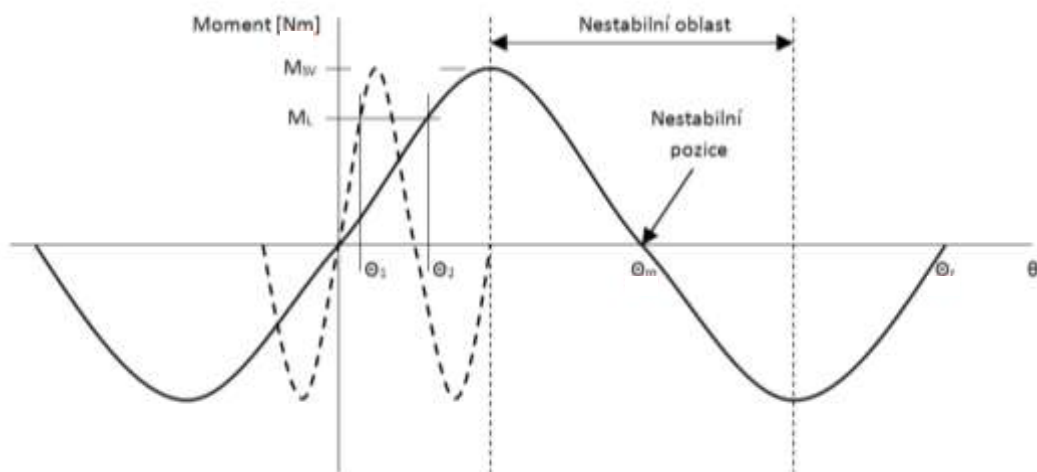
Výhodou tohoto způsobu řízení je dosažení velmi malých kroků motoru. Současné řídicí obvody umožňují rozdělit krok až na 128 mikrokroků. Tím dosáhneme u hybridního motoru s krokem  $1,8^\circ$  mikrokroku o velikosti  $0,0141^\circ$ . Další výhodou je snížení mechanických rezonancí, které můžou v krajním případě vést až ke ztrátě kroku. To je nebezpečné zvláště u systémů bez zpětné vazby. Nevýhodou je vzrůst relativní nepřesnosti mikrokroku - absolutní chyba kroku je pořád stejná (nezmenšuje se s mikrokrokováním). Použití motoru s větším počtem fází by mělo proti mikrokrokování výhodu ve strmější momentové charakteristice.

### 3.3 Základní charakteristiky krokových motorů

#### Statická momentová charakteristika krokového motoru

Závislost úhlu rozladění hřídele  $\theta$  (od jeho rovnovážné polohy  $\theta = 0$ ) na krouticím momentu zátěže [18]. Na obr. 3.11 jsou znázorněny průběhy pro dva krokové motory. Motor s větší velikostí kroku (plná čára) a s menší velikostí kroku (přerušovaná čára). Pro stejný moment  $M_L$  se hřídel motoru s menším krokem vychýlí o menší úhel. Motor má menší úhel rozladění a díky strmější charakteristice se rychleji ustálí.

Maximální hodnota krouticího momentu se nazývá statický vazební moment  $M_{SV}$ . Tímto momentem lze působit na hřídel stojícího nabuzeného motoru, aniž by došlo k přeskoku rotoru do následující rovnovážné polohy dané fází  $\theta_r$ . Velikost maximálního úhlu rozladění je větší, než velikost jednoho kroku a závisí na průběhu momentové charakteristiky a počtu fází motoru.

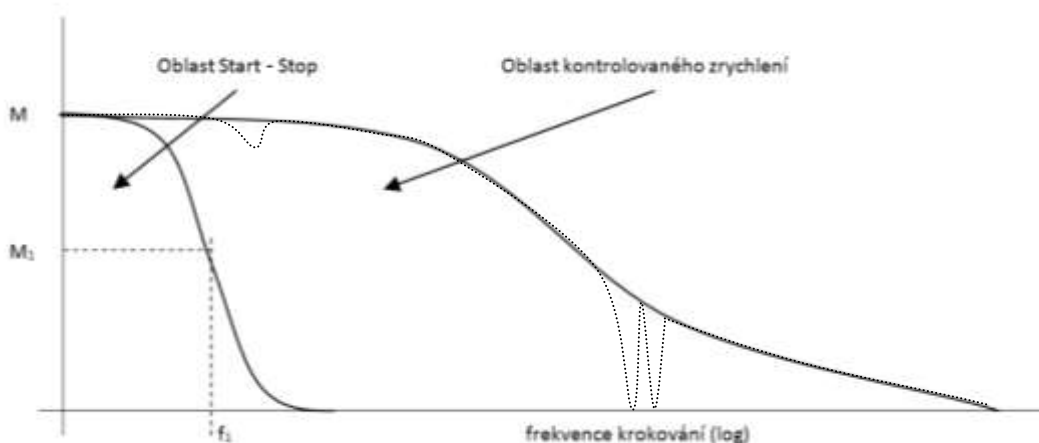


Obr. 3.11 Statická momentová charakteristika krokového motoru (Převzato z [19]).

### Momentová charakteristika krokového motoru

Na rozdíl od statické momentové charakteristiky znázorňuje momentová charakteristika závislost momentu na krokovací frekvenci (otáčkách motoru) [18]. Průběh charakteristiky je závislý na způsobu řízení a na zapojení vinutí motoru (bipolární a unipolární řízení, sériové a paralelní spojení vinutí). Vliv na tvar charakteristiky má také velikost napájecího napětí (proudu).

Momentová charakteristika (obr. 3.12) má dvě charakteristické části. První oblastí je oblast Start-Stop (rozběhová oblast). Tato oblast zahrnuje stavy, do kterých se může motor dostat z klidu po připojení řídicích impulsů bez ztráty kroku. Např. při zatěžovacím momentu můžeme přivést impulsy s kmitočtem  $f_1$ . Druhá oblast je oblast kontrolovaného zrychlení (provozní oblast). Této oblasti lze dosáhnout plynulým zvyšováním frekvence.



Obr. 3.12 Momentová charakteristika krokového motoru (Převzato z [19]).

V praxi se skutečná momentová charakteristika liší od ideálního průběhu. Tyto odlišnosti se projevují jako poklesy v momentové charakteristice na určitých krokovacích frekvencích. Možný průběh skutečné charakteristiky je na obr. 3.12 tečkovaně. Velikost a poloha poklesů je dána vlastnostmi motoru, způsobem buzení a zátěží. Existují dvě příčiny tohoto jevu:

- Vlastní rezonance – krokovací kmitočet se shoduje s vlastní frekvencí oscilace rotoru. Tento vliv se projevuje u nižších krokovacích frekvencí.
- Nestabilita – v určitých krokovacích kmitočtech může dosáhnout nestability celý systém. Základní příčinou je kladná zpětná vazba mezi motorem a budičem. Tento jev nastává v oblasti vyšších krokovacích frekvencí momentové charakteristiky. Pokud není vyžadována činnost v této oblasti, není nestabilita kritická pro provoz motoru.

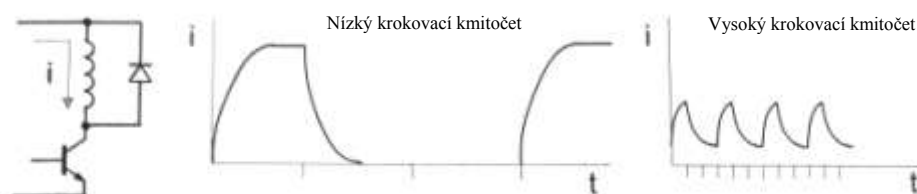
### 3.4 Budící obvody krokových motorů

Velký vliv na vlastnosti pohonu s krokovým motorem má i kvalita budících obvodů. Úkolem těchto obvodů je konverze napěťových impulsů odpovídajících jednotlivým krokům, na vhodný průběh proudů jednotlivými fázemi. Vinutí krokového motoru představuje indukčnost  $L$  a odpor  $R$  v sérii s cívkou. Při zapnutí a vypnutí proudu fáze dochází k přechodovým dějům, jejichž doba je dána časovou konstantou  $\tau=L/R$ . U nízkých krokovacích frekvencí je tato doba zanedbatelná vzhledem k době trvání ustáleného proudu ve vinutí. Problém nastává u vyšších frekvencí, kdy je doba pulsu tvořena pouze přechodovým dějem. V takovém případě začne klesat střední hodnota proudu ve vinutí a klesne moment krokového motoru [17].

Chceme-li zvýšit pásmo provozních kmitočtů, je nutné použít vhodný typ budícího obvodu. V praxi se používají tři následující typy [17], [18]:

#### Buzení z napěťového zdroje

Buzení z napěťového zdroje je nejjednodušším způsobem buzení krokového motoru (obr. 3.13) [17], [18]. Parametry takto buzeného motoru jsou negativně ovlivněny hlavně časovou konstantou vinutí. Ta udává dobu přechodového děje při zapínání a vypínání proudu vinutím. Tato časová konstanta se nepříznivě projevuje u vyšších frekvencí, kdy je velikost této konstanty srovnatelná s periodou jednoho kroku. V důsledku poklesu střední hodnoty proudu klesá i moment motoru. Průběhy proudů pro nízký a vysoký kmitočet jsou uvedeny na obr. 3.13.



Obr. 3.13 Buzení z napěťového zdroje (Převzato z [18]).

#### Buzení vnuceným proudem

Jedná se o buzení ze zdroje konstantního proudu [17], [18]. Zvyšuje se strmost přechodového děje a tím se zkracuje doba potřebná pro ustálení proudu. Zkrácení časové konstanty je docíleno přidáním odporu  $R_f$  sériově k cívce vinutí. Velikost časové konstanty je pak  $\tau=L/(R+R_f)$ . Zapojení obvodu pro tento způsob buzení je na obr. 3.14. Velikost odporu je 2x – 10x vyšší, než odpor vinutí. Nevýhodou tohoto zapojení je vyšší energetická náročnost (většina dodané energie se na rezistoru  $R_f$  přemění na teplo). Časové průběhy pulzů jsou uvedeny na obr. 3.14.

Další možností je použití čistého zdroje konstantního proudu s velkým vnitřním odporem.

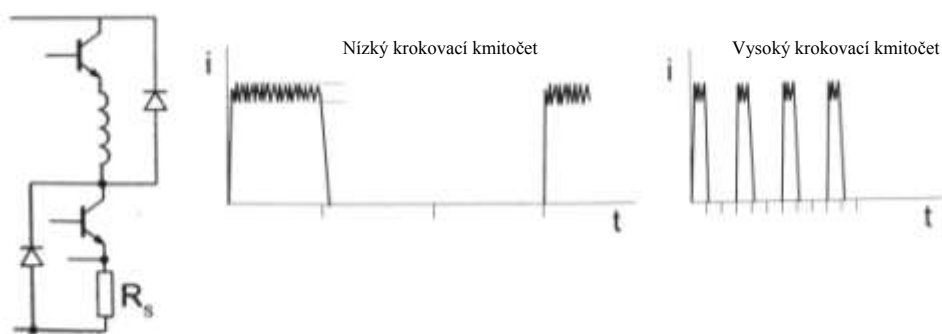


Obr. 3.14 Buzení vnuceným proudem (Převzato z [18]).

### Pulzní proudový zdroj – chopper

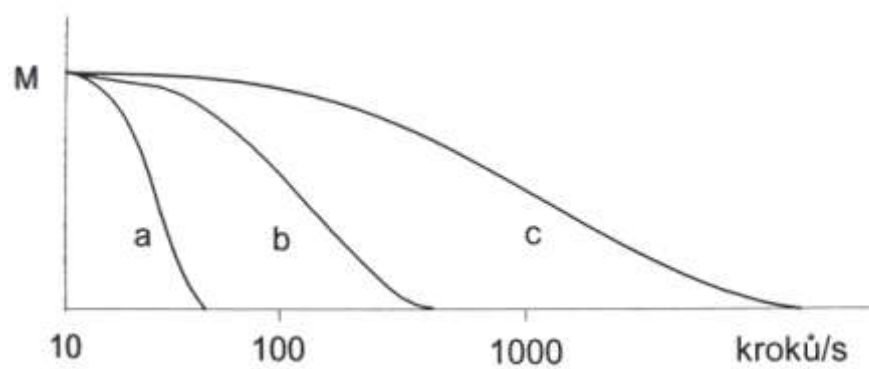
Tento budič je nejideálnějším typem buzení pro krokové motory a je hojně využíván díky podpoře výrobců integrovaných obvodů. Principiální schéma je uvedeno na obr. 3.15 spolu s průběhy proudu pro nízké a vysoké kmitočty. Z průběhu je patrné, že nedochází ke zmenšení momentu kvůli poklesu budícího proudu [17], [18].

I u tohoto zapojení je hlavní příčinou poklesu proudu a tím i momentu na vysokých kmitočtech velikost časové konstanty obvodu. Chopper tento vliv potlačuje použitím napětí, které je podstatně vyšší, než jmenovité napětí. Časová konstanta se nemění, ale sklon průběhu proudu je díky vyššímu napětí strmější. Výstupní proud je snímán a podle nastavené hodnoty je omezen a udržován na hodnotě jmenovitého proudu pro daný krokový motor.



Obr. 3.15 Pulzní proudový zdroj - Chopper (Převzato z [18]).

Srovnání momentových charakteristik uvedených typů buzení je uvedeno na obr. 3.16. Průběh *a* odpovídá buzení z napěťového zdroje, *b* buzení vnuceným proudem a průběh *c* je pro chopper. Z obrázku je zřejmé, že způsobem buzení je možné ovlivnit maximální rychlost motoru (stejný motor může mít pro jednoduchý budicí obvod maximální rychlost stovky kroků/s a pro složitější obvod až jednotky tisíc kroků/s).

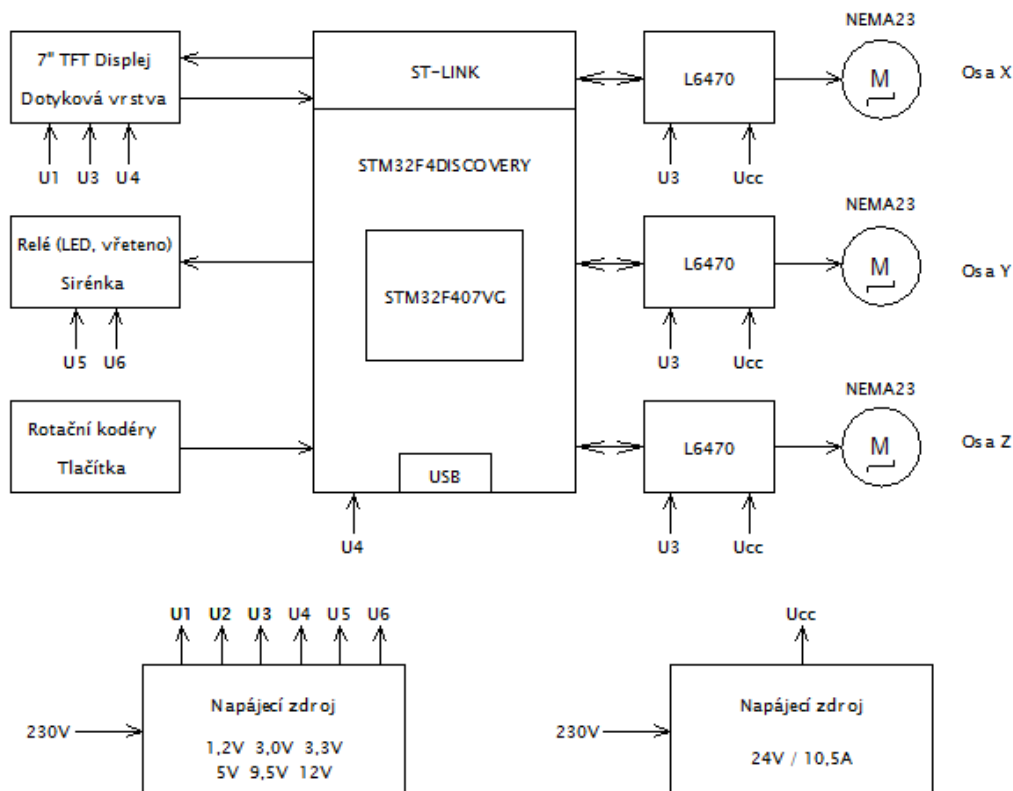


Obr. 3.16 Momentová charakteristika krokového motoru pro různé buzení (Převzato z [18]).

## 4 ŘÍDICÍ ELEKTRONIKA

Řídicí jednotka je srdcem celého zařízení. Jejím úkolem je komunikovat s okolím a na základě příkazů generovat impulsy pro ovládání krokových motorů. Hlavní částí jednotky je vývojový kit STM32F4DISCOVERY, který je osazen 32 bitovým procesorem STM32F407VG. Pro ovládání každého ze tří motorů je ke kitu připojen řadič pro krokové motory s obvodem L6470. Tento obvod zajišťuje také silovou část pro ovládání krokových motorů (obvod obsahuje dva H-můstky se zatížitelností 3 A pro napětí až 45 V). Pro komunikaci s okolím a zadávání dat je dále ke kitu připojen 7“ TFT displej s dotykovou vrstvou a čtyři rotační kodéry pro ruční ovládání. Zadávání dat pro vrtání je také možné přes rozhraní USB umístěné na vývojovém kitu. Blokové schéma celé řídicí jednotky je na obr. 4.1. Podrobnější popis zapojení je uveden v kapitole 4.6.

Pro napájení obvodů jsou použity dva nezávislé spínané zdroje. První zdroj slouží pro napájení řídicí části a poskytuje šest různých úrovní výstupního napětí a to 1.2 V, 3.0 V, 3.3 V, 5 V, 9,5 V a 12 V (některá výstupní napětí nejsou aktuálně využita). Druhý 24 V zdroj slouží pro napájení krokových motorů a jeho napětí je přivedeno na H-můstky motorových driverů. Oba zdroje jsou spínané, ale pro dosažení šesti různých úrovní napájecího napětí prvního zdroje je kvůli nízkým nárokům na odběr použito lineárních stabilizátorů. Schéma zapojení zdrojové části je v příloze A.1.



Obr. 4.1 Blokové schéma řídicí elektroniky.



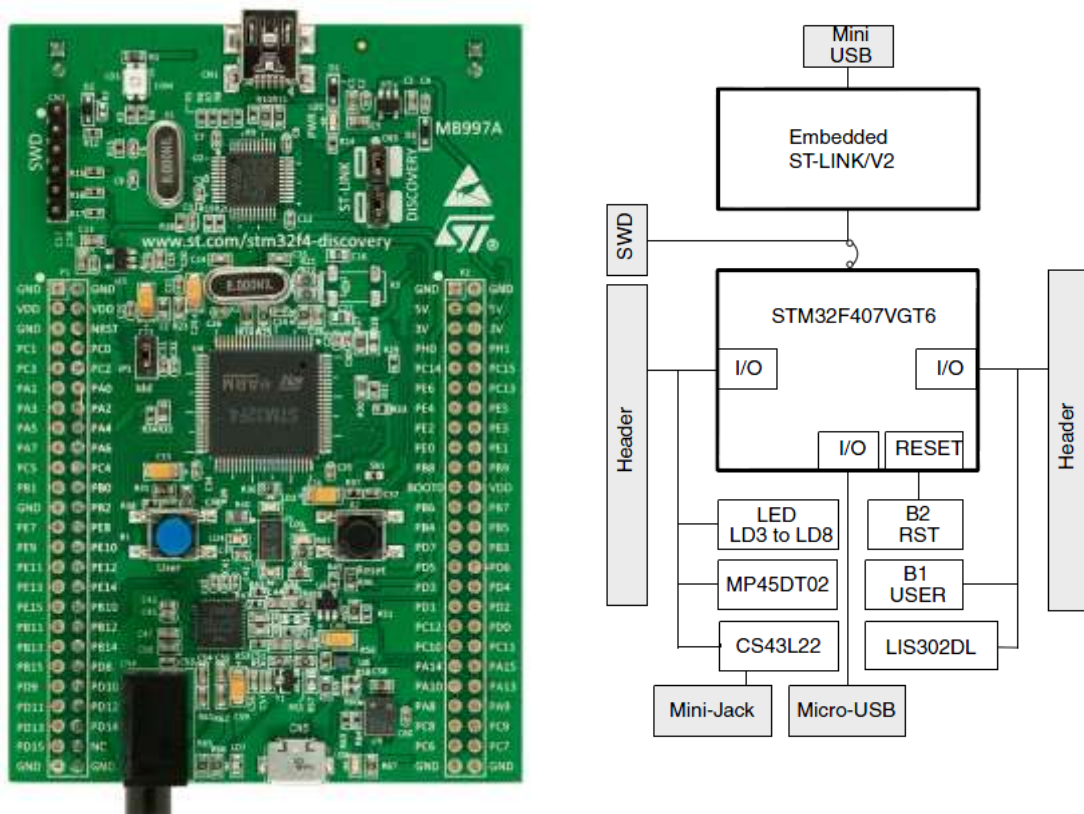
## 4.1 Vývojový kit STM32F4DISCOVERY

Jak již bylo řečeno hlavním prvkem řídicí elektroniky je 32 bitový procesor ARM od firmy ST osazený na vývojovém kitu STM32F4DISCOVERY (obr. 4.2). Tento kit kromě zmíněného procesoru STM32F407VG obsahuje také programátor ST-LINK/V2. Ten je možné využít jak pro procesor na desce, tak pro externí procesor připojený k pinům SWD konektoru. Pro nahrání programu do čipu stačí pouze USB kabel, což pro mě jako pro začátečníka s ARM bylo velmi výhodné.

Kromě zmíněného procesoru a programátoru vývojový kit disponuje následujícími periferiemi [21]:

- LIS302DL – tříosý akcelerometr s digitálním výstupem.
- MP45DT02 – audio senzor, všesměrový digitální mikrofón.
- CS43L22 – audio DA převodník s integrovaným zesilovačem třídy D.
- Čtyři LED diody pro uživatele.
- Dvě tlačítka pro uživatele.
- USB OTG rozhraní.

Kompletní schéma zapojení vývojového kitu je v příloze C.2.



## STM32F407VG

Jedná se o procesor ARM s 32 bitovou architekturou s jádrem Cortex M4, které pracuje na frekvenci 168 MHz. Jádro obsahuje jednotku pro výpočty s desetinnými čísly (FPU - Floating Point Unit) používající formát čísel Single Precision (32 bitů). Také je zde implementována kompletní sada DSP(Digital Signal Processor) instrukcí a jednotka pro ochranu paměti (MPU – Memory Protection Unit).

Procesor disponuje Flash pamětí o velikosti 1 MB, SRAM pamětí 192 kB (+ 4 kB zálohovací SRAM). Dále tento procesor nabízí např. následující periferie:

- 3x 12 bitový A/D převodník
- 2x 12 bitový D/A převodník
- 12x 16 bitový časovač
- 2x 32 bitový časovač
- 2x PWM generátor
- 3x SPI, 3x I2C , 2x I2S rozhraní
- 4x USART, 2x UART, 2x CAN
- Rozhraní USB 2.0
- SDIO/MMC rozhraní
- Paralelní rozhraní pro LCD displej (módy 8080/6800)
- Paralelní rozhraní pro digitální kameru (8 – 14 bitů, až 54 MB/s)
- Ethernet
- 2x 8 kanálové DMA
- Generátor náhodných čísel
- Jednotku pro výpočet CRC

Asi nejdůležitější vlastností je přítomnost až 140 univerzálních pinů, které je možné použít jako vstupy a výstupy pro volné použití programátora nebo slouží pomocí alternativních funkcí pinů k připojení periférií procesoru k externím obvodům. Všechny vstupně/výstupní porty a periferie jsou připojeny na dvě APB sběrnice a AHB sběrnice. Tyto sběrnice jsou propojeny 32 bitovou maticí, která propojuje zařízení Master (CPU, DMAs, Ethernet, USB HS) a Slave (Flash, RAM, FSMC, periferie na AHB a APB sběrnících). Tím je zajišťován plynulý a účinný chod procesoru, i když pracuje několik vysokorychlostních periférií současně [22], [23], [24].

Součástí vývojového kitu je procesor v pouzdře LQFP100, který má na desce k dispozici 80 vstupně výstupních pinů.

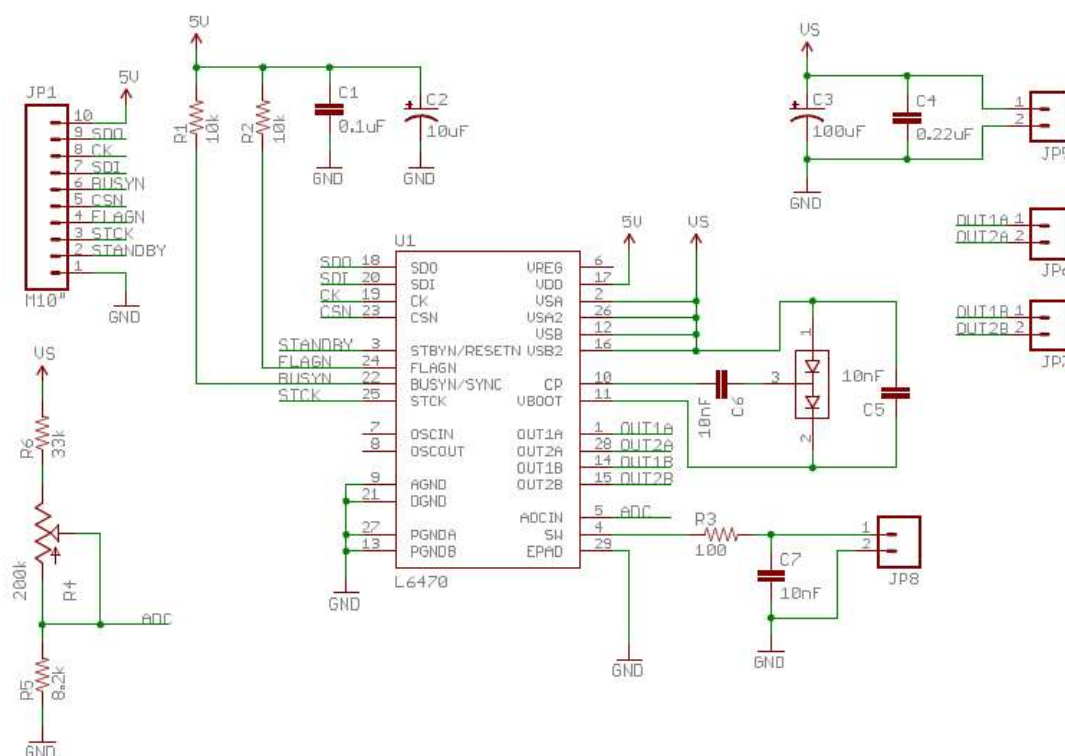
## 4.2 Driver pro krokové motory

Samotné impulsy pro krokování motoru nejsou generovány pomocí procesoru, ale pomocí třech modulů (obr. 4.3) připojených ke každému motoru. Tyto moduly jsou tvořeny řadičem pro řízení krokových motorů do firmy ST. Konkrétně se jedná o obvody L6470. Tento obvod podle instrukcí od procesoru generuje pulsy pro řízení kroků motoru a zároveň sleduje jeho absolutní polohu. Komunikace s procesorem je umožněna přes rozhraní SPI.

Kromě uvedeného obvodu L6470 modul obsahuje filtrační kondenzátory, pull-up rezistory a součástky pro „nábojovou pumpu“. Ta zajišťuje správnou funkci H-můstků tvořených MOSFET tranzistory (je nutné vyšší napětí, než napětí napájející krokové motory). Schéma zapojení modulu je na obr. 4.4 a v příloze C.1.



Obr. 4.3 Modul pro řízení krokových motorů (Převzato z [25]).



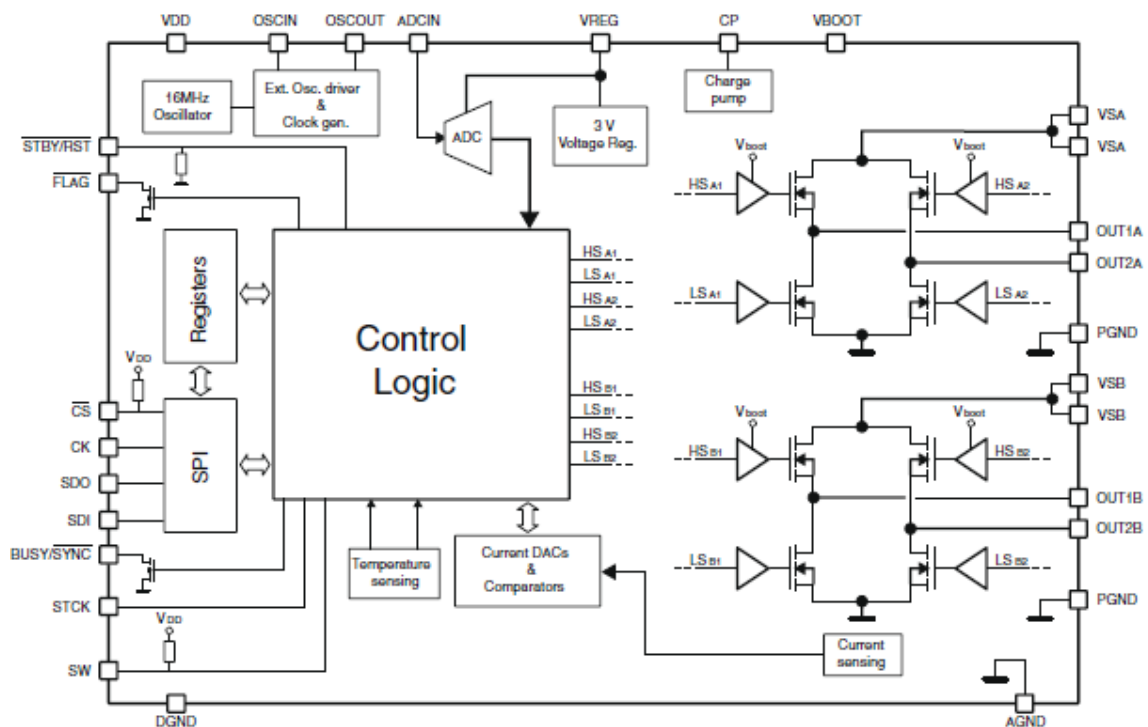
Obr. 4.4 Schéma zapojení modulu pro krokové motory (Převzato z [25]).

## L6470

Obvod L6470 umožňuje řízení dvoufázových bipolárních krokových motorů s maximálním proudem 3 A RMS (7 A špičkově) a napětovým rozsahem 8 – 45 V. Obvod funguje jako pulzní zdroj proudu (chopper) a proto je možné pro napájení motorů použít vyššího napětí a tím dosáhnout lepších parametrů (rychlost krokování, krouticí moment). Součástí obvodu jsou dva H-můstky tvořené tranzistory DMOS a obvod pro bezztrátové snímání a regulaci výstupního proudu. Řídící obvody umožňují řízení s plným krokem, polovičním krokem a také mikrokrokování (až 1/128 kroku).

Ovládání driveru je umožněno sadou příkazů. Ty jsou rozděleny do čtyř skupin – příkazy pro rychlostní řízení, příkazy pro dosažení cílové pozice, pohybové příkazy a příkazy pro zastavení. Nastavení všech analogových parametrů (max. proud motorem, nastavení napětí motoru v různých režimech apod.) a parametrů pro řízení pohybu (max. a min. rychlost, akcelerace, decelerace) je umožněno pomocí sady registrů. Ty jsou nastavovány pomocí 5 Mbit/s SPI rozhraní.

Obvod také umožňuje využití široké škály ochran (tepelná, ochrana při nízkém napětí, proudová ochrana a další). Blokové schéma obvodu L6470 je uvedeno na obr. 4.5. Obvod umožňuje využít jak TTL, tak i CMOS logiku. Pomocí vstupu STCK je možné řídit kroky motoru hranou externího obdélníkového signálu [26].



Obr. 4.5 Blokové schéma obvodu L6470 (Převzato z [26]).

### 4.3 TFT displej

Pro komunikaci s obsluhou je v zařízení použitý barevný 7“ TFT displej s rozlišením 480 x 800 pixelů. Displej umožňuje využít až 24 bitovou barevnou hloubku. V tomto zapojení bude využito jen 16 bitů (režim 565 RGB), k čemuž je využit jeden port procesoru STM. Při této konfiguraci je možné dosáhnout 65 536 barev.

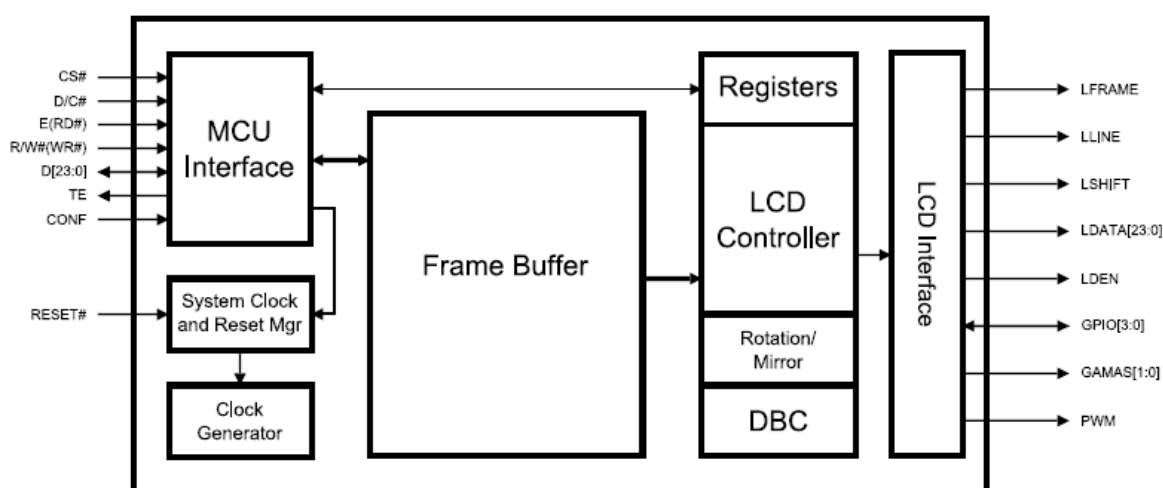
DPS displeje je vybavena obvodem SSD1963, který komunikuje s procesorem a podle dat na vstupu zajišťuje řízení displeje a zobrazení požadovaných informací. Displej je také opatřen rezistivní dotykovou vrstvou. Ta je připojena k obvodu MAX11802. Tento obvod zasílá data procesoru přes rozhraní SPI. Při odesílání dat je možné využít speciálního výstupu pro generování přerušování.

Podsvícení displeje je řešeno osmnácti LED diodami, které je možné řídit pomocí PWM regulátoru. Více informací a zapojení vývodů nalezneme v [28].

#### SSD1963

SSD1963 je řadič pro LCD displeje s pamětí 1215 kB. To umožňuje použít řadič pro displeje s rozlišením až 864 x 480 pixelů s barevnou hloubkou až 24 bitů. Propojení s procesorem je realizováno pomocí paralelní sběrnice s volitelnou šířkou (8, 9, 12, 16, 18, 24 bitů). Komunikace s procesorem probíhá v jednom ze zvolených módů. Prvním je mód 6800, kdy jsou pro řízení použity signály CS#, D/C#, E(RD#) a až 24 datových signálů. Druhým módem je mód 8080. Ten sestává ze signálů CS#, D/C#, RD#, WR# a až 24 datových signálů [29].

Pomocí řadiče je možné obraz hardwarově otáčet (0°, 90°, 180°, 270°) a zrcadlit. Obvodem lze také řídit jas a kontrast displeje. Blokové zapojení obvodu SSD1963 je uvedeno na obr. 4.6.

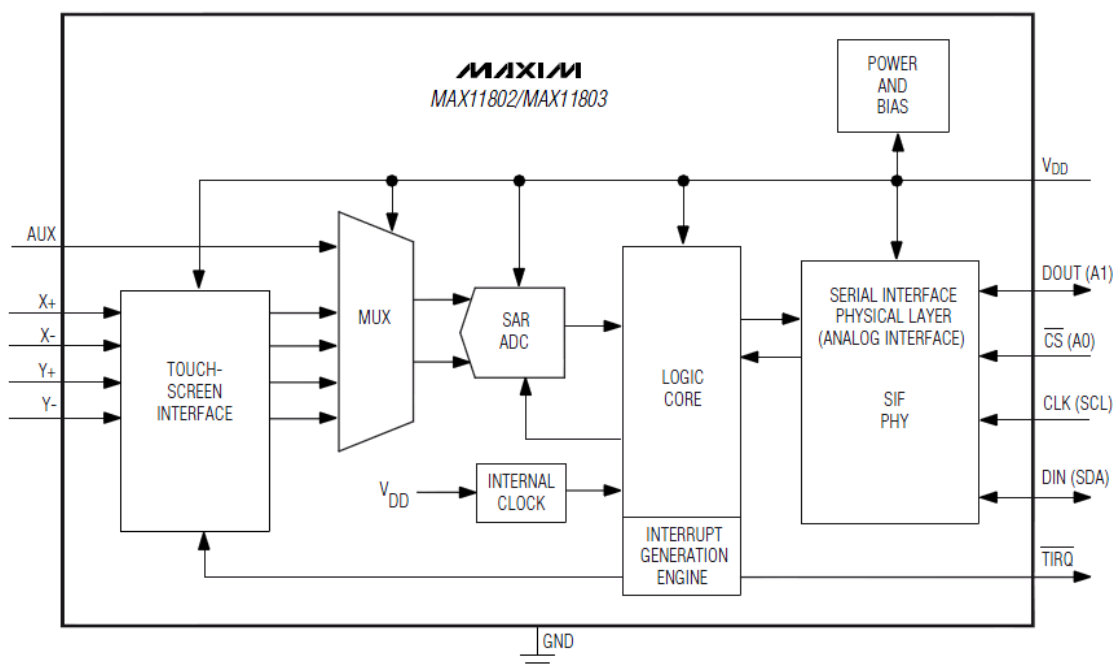


Obr. 4.6 Blokové schéma obvodu SSD1963 (Převzato z [29]).

## MAX11802

Pro možnost použití dotykové vrstvy je DPS displeje doplněna obvodem MAX11802. Je to obvod určený pro rezistivní dotykové vrstvy. Pomocí tohoto řadiče lze odečítat polohu dotyku ve dvou osách. Základem je multiplexer a 12 bitový AD převodník. Analogová hodnota odporu každé osy je tedy reprezentována 12 bitovým číslem, které se poté v řídicím procesoru přepočte na souřadnici pixelu [30].

Data jsou do řídicího procesoru zasílána přes SPI rozhraní. Pro možnost generování přerušení za účelem okamžité reakce na dotyk je obvod vybaven speciálním výstupem. Nízká úroveň tohoto výstupu indikuje přítomnost dotyku displeje. Blokové schéma obvodu zobrazuje obr. 4.7.



Obr. 4.7 Blokové schéma obvodu MAX11802 (Převzato z [30]).

## 4.4 Krokový motor NEMA23

Jedná se o dvoufázový krokový motor s axiálně polarizovaným magnetem rotoru (hybridní krokový motor) [27]. Motor je v provedení se čtyřmi vývody a je buzen bipolárně dvěma H-můstkami obvodu L6470. Úhel jednoho kroku motoru je  $1,8^\circ$ , čemuž odpovídá 200 kroků na otáčku. Krouticí moment motoru je 1,89 Nm, což by mělo být pro danou aplikaci dostatečné. Parametry motoru jsou uvedeny v tabulce tab. 4.1.

Tab. 4.1 Parametry motoru NEMA23.

Parametr	Hodnota
Počet fází	2
Počet vývodů	4
Úhel kroku	$1,8^\circ \pm 5\%$ (200 kroků)
Jmenovité napětí	3,1 V DC
Jmenovitý proud	2,8 A DC / fáze
Odpor vinutí	$1,1\ \Omega \pm 15\%$ / fáze
Indukčnost vinutí	$4,5\ \text{mH} \pm 20\%$ / fáze
Max. rychlost otáčení	$\geq 2500$ kroků/s
Max. rychlost otáčení při rozběhu	$\geq 1500$ kroků/s
Krouticí moment	18,9 kg·cm
Délka motoru	76 mm
Šířka / Výška motoru	56 x 56 mm

## 4.5 Napájecí zdroje

Jak již bylo uvedeno v blokovém schématu, pro napájení celého zařízení jsou použity dva samostatné spínané zdroje. První zdroj slouží k napájení řídicí elektroniky (napětí 1.2 V, 3.0 V, 3.3 V, 5 V), osvětlovací LED diody (9,5 V) a ovládání relé vřetena (12 V). Tento zdroj je realizován komerčně dostupným 1,8 A spínaným adaptérem 12 V v kombinaci s lineárními stabilizátory pro jednotlivé úrovně napětí.

Druhý zdroj slouží k buzení krokových motorů. Motor je tvořen dvěma cívkami, které můžeme popsat jako sériovou kombinaci cívky a rezistoru. U použitého motoru jsou podle tab. 4.1 parametry následující  $R = 1,12\ \Omega$  a  $L = 4,5\ \text{mH}$ . Ze sériového zapojení můžeme odvodit rovnici [1].

$$U = u_R + u_L = Ri + \frac{di}{dt}L \quad (4.1)$$

Tuto rovnici upravíme a získáme vztah pro proud cívkou v čase [2]:

$$i = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\left(\frac{R}{L}t\right)} \right) \quad (4.2)$$

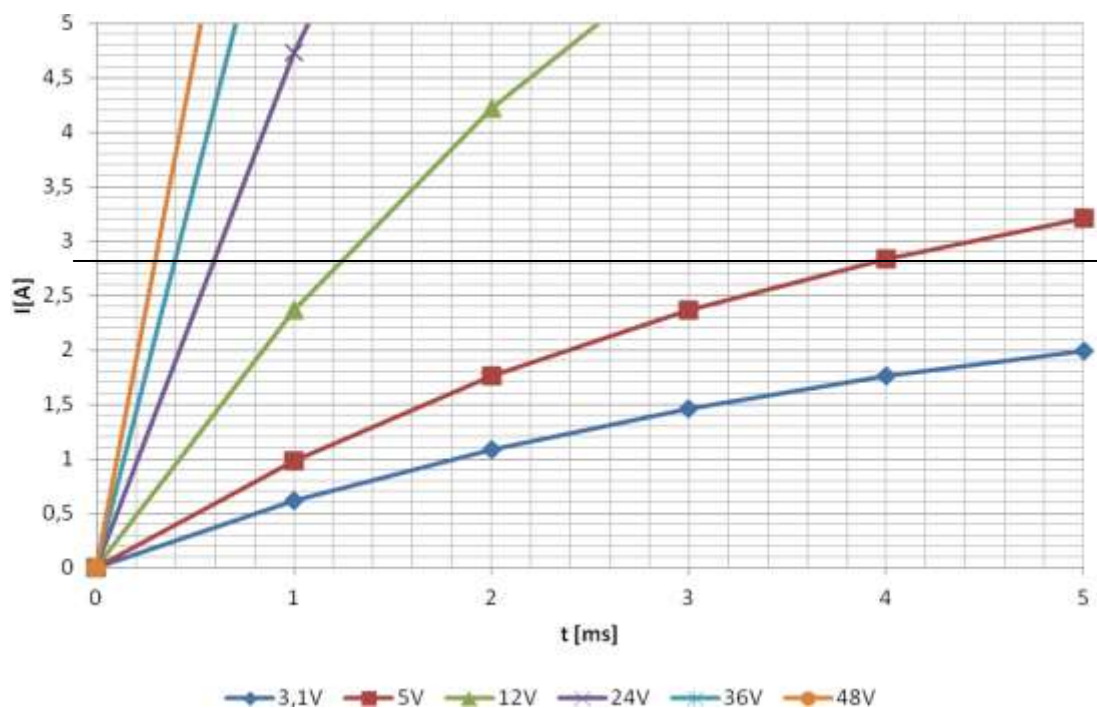
Na obrázku obr. 4.8 je vynesena závislost proudu motoru na čase pro různá budicí napětí. Jak je vidět, tak při použití jmenovitého napětí 3,1 V roste proud velmi pomalu a na hodnotu 2,8 A se dostane asi po 17 ms. Při 200 krocích na otáčku je potřeba 3,4 s pro jednu otočku hřídele (pro použitý šroub to znamená lineární posun o 4 mm). Se zvyšujícím se napětím roste i strmost nárůstu proudu. Např. pro napětí 12 V se doba zkrátí



ze 17 ms na 1,13 ms a pro napětí 24 V na 0,6 ms. Při dalším zvyšování napětí již není pokles času k dosažení 2,8 A tak významný. Proto byl pro napájení motorů zvolen průmyslový zdroj 24 V o výkonu 250 W (10,5 A), (obr. 4.10), [31].

Pro napětí 24 V je potřeba pro dosažení jmenovitého proudu čas 0,6 ms a jedna otočka hřídele (200 kroků) trvá 120 ms. To znamená, že motor za jednu sekundu vykoná asi 8,3 otáčky (asi 1667 kroků za sekundu). Této rychlosti otáčení odpovídá lineární posuv 33,2 mm za sekundu pro osy X a Y a 24,9 mm za sekundu pro osu Z. Skutečná rychlost otáčení by měla být o něco vyšší, protože při vyšších rychlostech není nutné dosáhnout jmenovité hodnoty proudu motoru.

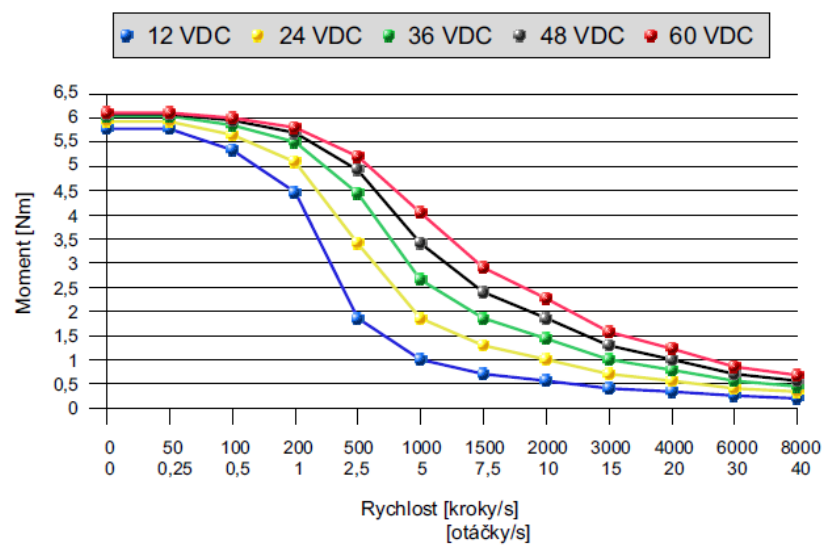
Výhodou použití vyššího napětí je strmost nárůstu proudu. Nevýhodou je nutnost regulace proudu po dosažení jmenovitého proudu (zde 2,8 A). Pokud by proud nebyl regulován, vzrůstal by proud vinutím a zvyšoval by se ztrátový výkon motoru. To by vedlo k nárůstu teploty a následně ke zničení motoru. Řešením tohoto problému je použití buzení motoru proudovým pulzním zdrojem. Obvod L6470 využívá tento typ budiče a dovoluje použít napětí pro napájení motoru až 45 V.



Obr. 4.8 Průběh proudu cívkou motoru pro různá budící napětí.

Velikost budícího napětí má také vliv na velikost momentu motoru při daných otáčkách. Na nízkých rychlostech není moment významně závislý na napětí, protože čas jednoho kroku je dostatečný pro dosažení jmenovitého proudu i pro nízké napětí. Při vyšších rychlostech se začne závislost projevovat více kvůli krátké době trvání jednoho kroku. Pokles momentu motoru je potom přímo úměrný poklesu budícího napětí. Tato závislost je zobrazena na obr. 4.9 [32].





Obr. 4.9 Závislost momentové charakteristiky na napětí motoru (Převzato z [32]).



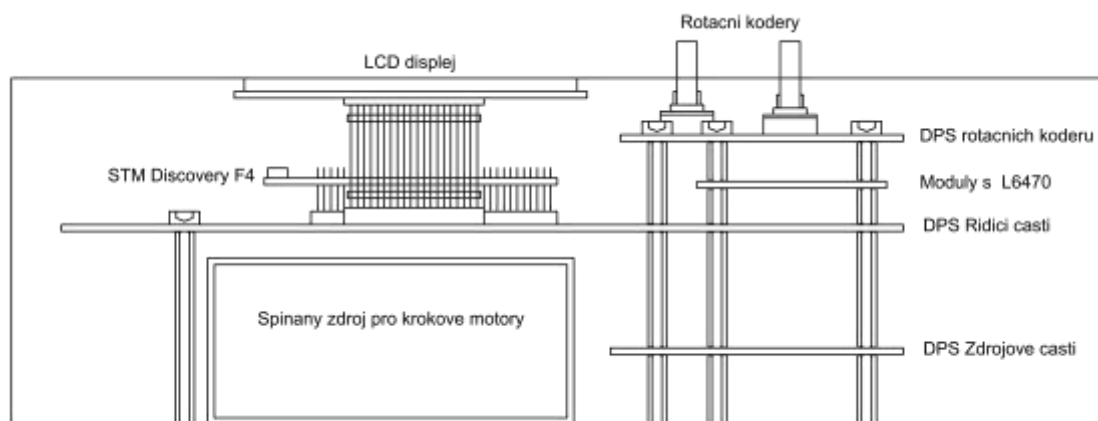
Obr. 4.10 Použitý spínaný napájecí zdroj pro buzení krokových motorů.

## 4.6 Celkové zapojení a konstrukce řídicí elektroniky

Celkové elektrické zapojení je rozděleno na tři menší části. Každá z těchto částí je tvořena samostatnou DPS. Největší DPS je základní deska pro řídicí část na které jsou osazeny nejdůležitější řídicí prvky jako je vývojový kit s ARM procesorem, LCD displej a tři moduly s řadiči krokových motorů. Zbylé dvě desky jsou menšího rozměru. Na první z nich jsou zapojeny rotační kodéry pro ruční ovládání. Tato deska ve spojení s vrchním plechem krabice ovládání tvoří dvojité panel a slouží hlavně pro uchycení rotačních kodérů. Druhou desku tvoří zdrojová část. Zde jsou umístěny zdroje pro základní desku a rozvod 230 V pro oba zdroje a vřeten. Všechna schémata zapojení, návrhy DPS a osazovací plány je možné nalézt v přílohách A a seznam součástek potřebných pro výrobu zařízení v příloze B.

Všechny tři desky jsou umístěny nad sebou a jsou sešroubovány pomocí distančních sloupků. Boční pohled na montáž DPS v krabici ovládání je uveden na obr. 4.11. Krabice je v podstatě horizontálně rozdělena na dvě části. Ve spodní části se nachází oba zdroje a ze zadní strany konektory. Ve vrchní části jsou umístěny všechny ovládací a řídicí prvky.

Podrobnější popis zapojení jednotlivých desek bude uveden v následujících podkapitolách.



Obr. 4.11 Boční pohled na uspořádání DPS v krabici ovládání.

### 4.6.1 Zdrojová část

Úkolem této části je mimo jiné distribuce síťového napětí 230 V pro oba napájecí zdroje a vřeten. Napětí 230 V je sem přivedeno z dvojice vypínačů na panelu. Prvním vypínačem se přivádí napětí ke zdroji pro krokové motory a vřeten. Napětí ke vřeten není vedeno přímo, ale přes relé, které je ovládáno mikrokontrolérem. Druhý vypínač spíná napětí pro zdroj řídicí části. Samozřejmostí je zapojení pojistek pro všechny tři větve síťového napětí.

Dalším úkolem je vytvoření šesti úrovní napájecího napětí pro řídicí část. Za tímto účelem je použit malý komerčně dostupný spínaný zdroj určený k zapájení přímo do DPS. Jeho výstupní napětí je 12 V a výkon 20 W. Pro dosažení všech úrovní napětí je použito lineárních stabilizátorů doplněných potřebnými kondenzátory. Pro napětí 1.2 V,

3.0 V, a 3.3 V je použito stabilizátorů MCP1826. Jejich max. vstupní napětí je 6 V, proto je napětí z 12 V před-stabilizováno obvodem LD1086 na 5 V. Obvody LD1086 jsou také použity pro stabilizaci napětí 5 V a 9.5 V. Napětí 12 V je odebíráno přímo ze zdroje. Každý z šesti výstupů je opatřen pojistkou.

Podrobné schéma zapojení zdrojové části lze nalézt v příloze A.1, desku plošných spojů v A.2 a osazovací plány v přílohách A.3 a A.4.

Tab. 4.2 Přehled použitých napájecích napětí.

Úroveň napětí	Napájená periferie
1.2 V	Napájení obvodů displeje
3.0 V	Zatím nevyužito
3.3 V	Napájení obvodů displeje, Napájení modulů s L6470
5 V	Podsvícení displeje, Napájení kitu Discovery F4
9.5 V	LED osvětlení stroje
12 V	Relé vřetena

Poslední trojice pojistek v zapojení zdrojové části slouží k jištění napájecího napětí trojice krokových motorů (24 V zdroje pro krokové motory).

#### 4.6.2 Rotační kodéry

Tuto část tvoří pouze čtveřice rotačních kodérů doplněná RC členy pro odstranění záskmitů. RC členy jsou připojeny jak k oběma výstupům kodéru, tak i k tlačítku ovládaném hřídelkou. DPS je propojena s řídicí částí pomocí kolíkové a dutinkové lišty. Hlavním úkolem desky je mechanické upevnění kodérů.

Požadovaná funkce jednotlivých rotačních kodérů v závislosti na stisknutí tlačítka ovládaného hřídelkou je uvedena v tab. 4.3.

Schéma desky s rotačními kodéry je uvedeno v příloze A.5, návrh plošného spoje v A.6 a osazovací plány v přílohách A.7 a A.8.

Tab. 4.3 Funkce jednotlivých rotačních kodérů.

Rotační kodér	Funkce	
	Rozepnuté tlačítko kodéru	Sepnuté tlačítko kodéru
Axis X	Osa X – Posuv pomalu	Osa X – Posuv rychle
Axis Y	Osa Y – Posuv pomalu	Osa Y – Posuv rychle
Axis Z	Osa Z – Posuv pomalu	Osa Z – Posuv rychle
Drill diam. / Spindle speed	Nastavení průměru vrtáku	Nastavení otáček vřetena

### 4.6.3 Řídicí část

Největší část zapojení, která realizuje propojení všech modulů s procesorem. Pomocí kolíkových a dutinkových lišt jsou všechny použité moduly připojeny k DPS. Součástí zapojení je dvojice unipolárních tranzistorů připojených ke dvěma relé. Tato relé slouží pro ovládání vřetena a LED osvětlení stroje. Další tranzistor slouží ke spínání sirénky potvrzující dotyk displeje.

Na okrajích desky jsou vyvedeny svorky pro připojení dvou tlačítek (Central stop, Reset mikrokontroléru). Svorky jsou rovněž opatřeny RC členy pro odstranění záskmitů tlačítek. Na desce nalezneme také dvojice svorky s označením D/A. První dvě svorky jsou přivedeny na piny procesoru, na něž je možné připojit dva interní D/A převodníky. Další čtyři svorky jsou běžnými výstupy procesoru a je možné připojit je ke čtyřbitovému externímu D/A převodníku. Obě možnosti jsou určeny k budoucí plynulé regulaci otáček vřetena (programově je plynulá změna otáček podporována, bude doplněn pouze regulátor).

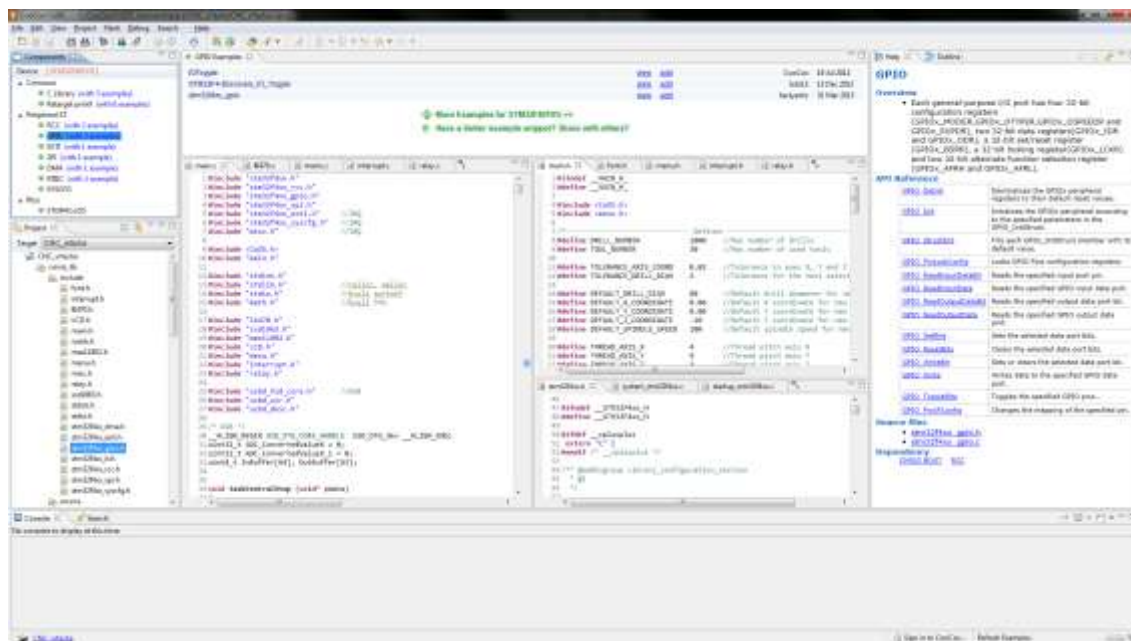
Kompletní schéma zapojení řídicí části zobrazuje příloha A.9, návrhy oboustranného plošného spoje jsou uvedeny v A.10 a A.11 a plány pro osazení v přílohách A.12 a A.13.

## 5 PROGRAM MIKROKONTROLÉRU

### 5.1 Vývojové prostředí

Jak již bylo v textu uvedeno o celkové řízení vrtačky se stará 32 bitový procesor ARM STM32F407VG. Ten je naprogramován pomocí programátoru ST-Link, který je součástí vývojové desky STM Discovery F4. Pro vytvoření zdrojového kódu v jazyce C bylo použito vývojového balíčku CoCox [34]. Ten je tvořen programy CoIDE, CoFlash, CoSmart, CoAssistant.

Nejdůležitějším programem balíčku je CoIDE (obr. 5.1). Jedná se o vývojové prostředí pro procesory ARM s jádrem Cortex. Vývojové prostředí je zdarma a podporuje procesory různých výrobců. Např. procesory Freescale, Atmel, NXP, Nuvoton a v neposlední řadě procesory ST. Pro podporované procesory jsou součástí vývojového prostředí vytvořené knihovny pro všechny periferie procesoru a nápověda k jejich použití. Pro začátečníky jsou uvedeny i vzorové projekty používající jednotlivé periferie.

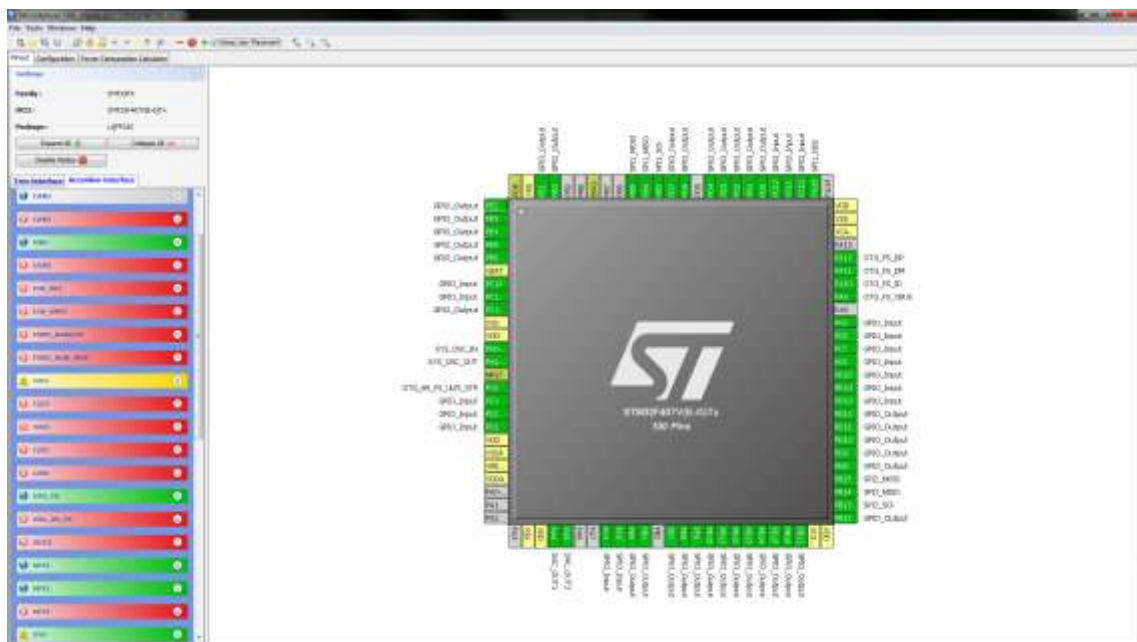


Obr. 5.1 Vývojové prostředí CoIDE.

Nedílnou součástí CoCox je Real-Time multi-task operační systém CoOS pro procesory Cortex-M, který byl využit při programování. Operační systém podporuje preemptivní plánování a algoritmus Round-Robin. Pro synchronizaci tasků je možné využít Semafory, Mutexy a Flagy. Komunikaci mezi tasky umožňují Mailboxy a Fronty.

## 5.2 Použité programy

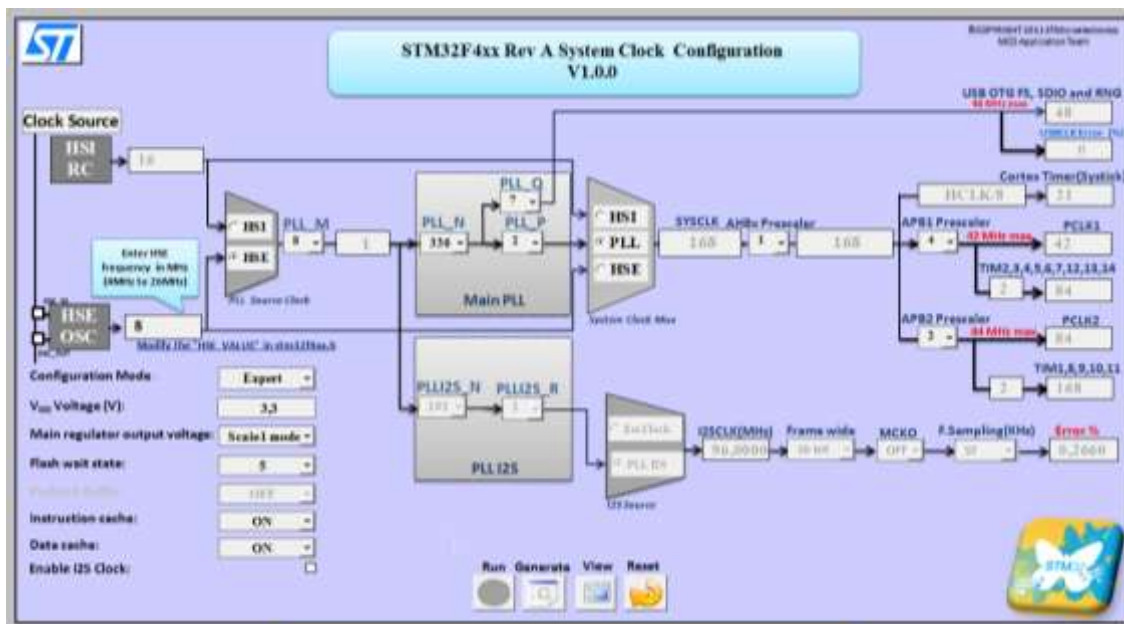
Velkým pomocníkem při návrhu zapojení s větším procesorem STM může být program MicroXplorer. Program je volně dostupný na webových stránkách výrobce [35]. Program přiřazuje jednotlivé periferie daným vývodům součástky a znemožňuje připojit více periférií na jeden vývod. Možnost použití periferie je určena barvou v levém sloupci (obr. 5.2). Bílá barva indikuje, že periferie musí být pro možnost použití první aktivována, zelená barva značí možnost využití periferie bez omezení, žlutá barva signalizuje omezení v použití periferie (není možné využít všechny funkce, snížená rychlost) a červená barva signalizuje, že periferii není možné použít, protože potřebné piny jsou již použity za jiným účelem. Obdobou tohoto programu je program CoSmart z balíčku CooCox. Ten ovšem podporuje jenom procesory Holtek a Nuvoton.



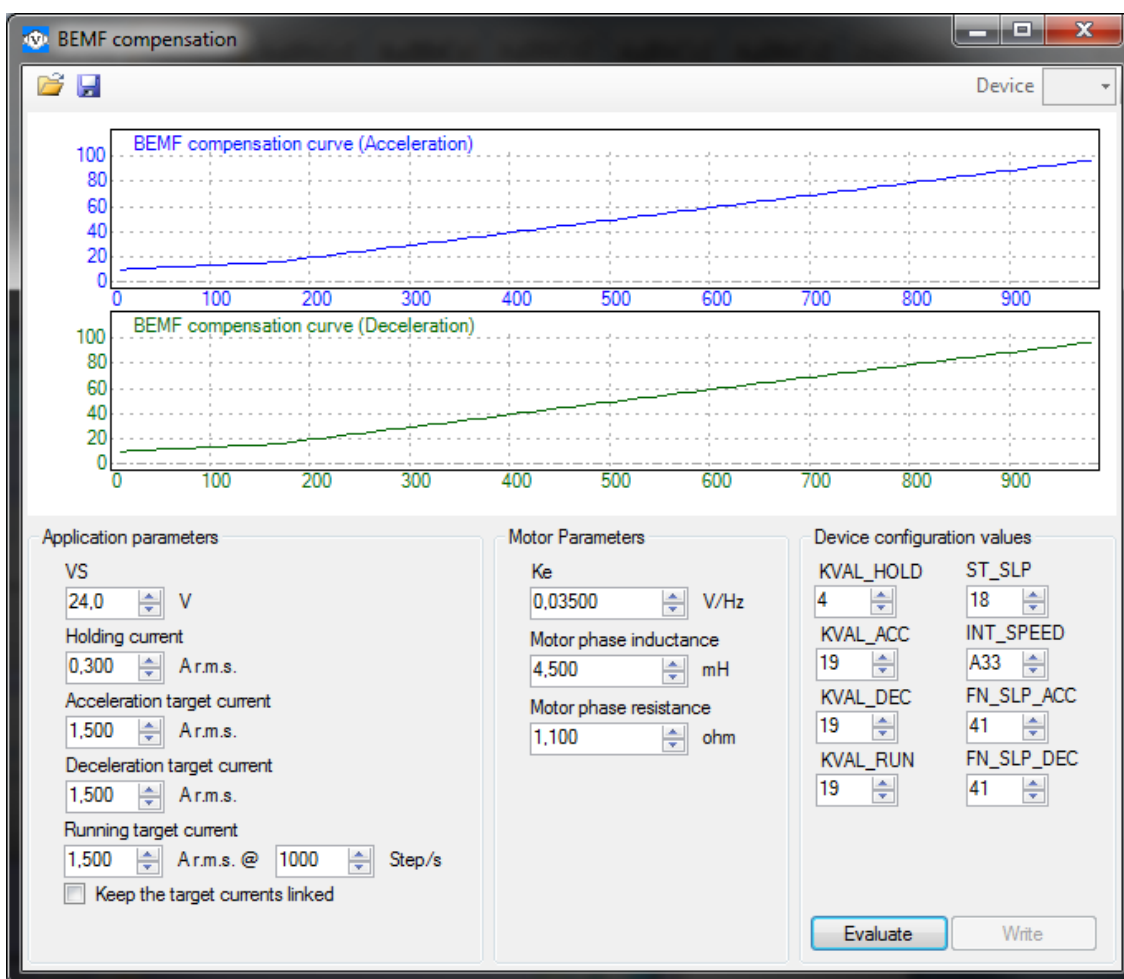
Obr. 5.2 Program MicroXplorer.

Pro celkové nastavení hodinového kmitočtu (zdroj hodinového kmitočtu, děličky kmitočtu) procesoru bylo použito aplikace STM32F4xx Rev A System Clock Configuration V1.0.0 pro Microsoft Excel. Aplikace je v novější verzi V.1.1.0 volně dostupná na stránkách výrobce procesoru [36]. Výstupem aplikace je soubor system\_stm32f4xx.c, který stačí vložit do projektu. Ukázka aplikace je na obr. 5.3.

K nastavení řadičů L6470 (podporované jsou také obvody L6472, L6480, L6482 a powerSTEP01) je možné využít program SPINFamily Evaluation Tool. Asi největší výhodou při použití je návrh kompenzace BEMF (včetně zobrazení kompenzační křivky pro akceleraci a deceleraci (obr. 5.4)). Používáme-li navíc vývojovou desku STEVAL-PCC009V2 je možné řadič ovládat přímo z PC (umožňuje zapisovat a číst data z registrů, zobrazovat status řadiče, přímo ovládat motory). Výstupem programu je hlavičkový soubor s nastavením všech registrů. Program je také volně dostupný na stránkách výrobce řadiče [37].



Obr. 5.3 Aplikace STM32F4xxRev A System Configuration.



Obr. 5.4 Program SPINFamily Evaluation Software – Návrh kompenzace BEMF.

## 5.3 Program mikrokontroléru - knihovny

V rámci tohoto projektu bylo nejprve nutné vytvořit knihovny pro všechny moduly, které jsou v řídicí části využity. Asi nejdůležitější knihovnou pro účely CNC stroje je knihovna l6470.h. Tato knihovna obsahuje všechny potřebné funkce pro ovládání motorů všech os. Pro možnost vizualizace všech dat a stavů stroje je použit LCD displej. Řadič tohoto displeje využívá knihovnu ssd1963.c. Součástí tohoto souboru je funkce pro vykreslení jednoho pixelu. Na tuto funkci navazuje knihovna LCD.c. Ta slouží pro vykreslování jednoduché grafiky na displeji. Pro řadič rezistivní dotykové vrstvy je určena knihovna max11802.c. Obsluhy všech přerušení jsou v knihovně interrupt.c. Funkce pro ovládání relé a sirénky jsou napsány v souboru relay.c a vykreslování jednotlivých listů menu umožňují funkce v souboru menu.c.

Kromě vlastnoručně napsaných knihoven bylo využito velké množství knihoven od výrobce procesoru. Ty jsou součástí prostředí CoIDE a vkládají se automaticky po zvolení periferie, která bude využívána.

Pro vytvoření dokumentace zdrojového kódu je možné využít některý z nástrojů pro generování dokumentace ze zdrojového kódu, např. nástroj Doxygen [38]. Ten generuje dokumentaci z komentářů umístěných přímo ve zdrojovém kódu projektu (komentáře musí splňovat podporovaný styl). Závislosti mezi jednotlivými moduly projektu je možné graficky znázornit např. pomocí programu Graphviz [39]. Ten umožňuje vytvářet grafy ze souborů ve formátu DOT (výstup z programu Doxygen).

### **main.c (main.h)**

V tomto souboru je kromě nejdůležitější funkce main, která se stará o počáteční nastavení procesoru, definování výchozích stavů, alokace paměti a vytvoření operačního systému, deklarováno pět funkcí. Funkce Setup se stará o počáteční konfiguraci procesoru a inicializaci všech periférií. Další funkce slouží pro ukládání stavu LCD, otáček vřetena a průměru vrtáku (nahrazení globálních proměnných). Poslední funkce slouží pro zjištění počtu vrtaných děr.

```
void Setup (void);
```

Provede konfiguraci vývodů procesoru a následnou inicializaci připojených periférií.

```
display_status_t LCD_Status (display_status_t);
```

Vrací aktuální status displeje, případně ukládá nový status.

```
uint8_t SpindleSpeed (uint8_t);
```

Slouží pro ukládání otáček vřetena.

```
uint16_t DrillDiameter (uint16_t);
```

Slouží pro ukládání požadovaného průměru vrtáku.

```
uint16_t LengthOfStruct (void);
```

Zjištění délky pole struktur, v němž jsou uloženy souřadnice děr (počet děr v seznamu).

Definice proměnných a konstant pro použití mutexů, tasků, flagů a mailboxů jsou uvedeny v souboru main.h. Zde nalezneme také definici struktury pro ukládání souřadnic a definice konstant pro celkové nastavení programu a stroje (stoupání závitů, max. počet vrtaných děr, max. počet nástrojů a další).



## **l6470.c (l6470.h)**

Jak bylo uvedeno výše, tato knihovna slouží pro komunikaci s řadiči krokových motorů. Jelikož vrtačka je tříosé zařízení a v zapojení jsou řadiče tři, je prvním parametrem téměř všech funkcí název osy, kterou chceme ovládat. Jelikož mikrokontrolér umožňuje využít pouze jeden hardwarový Chip Select, bylo nutné vytvořit dvě funkce pro ovládání třech výstupů, které jsou za tímto účelem využity. Vybrané funkce knihovny:

```
void L6470_SPI_Config (void);
```

Funkce pro nastavení parametrů SPI rozhraní pro komunikaci s obvodem L6470.

```
void L6470_Init (void);
```

Provádí počáteční nastavení všech registrů řadiče pro všechny tři osy.

```
void CS_Low (axis_t);
```

Chip Select vybrané osy na úroveň Low.

```
void CS_High (axis_t);
```

Chip Select vybrané osy na úroveň High.

```
void Busy (axis_t);
```

Čekání, pokud je zvolený L6470 zaneprázdněný.

```
void L6470_SetParam(axis_t, reg_name_t, uint32_t, uint32_t, uint32_t);
```

Funkce zapisuje požadovanou hodnotu do zvoleného registru pro zadanou osu.

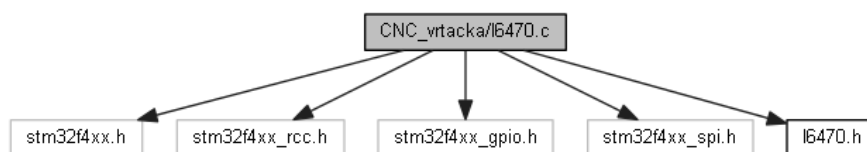
```
int32_t L6470_GetParam (axis_t, reg_name_t);
```

Vrací hodnotu uloženou ve zvoleném registru.

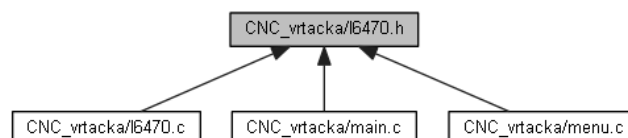
```
uint16_t L6470_GetStatus (axis_t);
```

Přečte Status registr řadiče zvolené osy (zjištění chybových hlášení).

Pro jednoduchost používání jsou v souboru L6470.h uloženy adresy všech registrů řadiče a pro některé z registrů také předvolby nastavení parametrů (např. nastavení kmitočtu obvodu, nastavení kmitočtu PWM).



Obr. 5.5 Hlavičkové soubory volané z l6470.c.



Obr. 5.6 Soubory využívající hlavičkový soubor l6470.h.

### ssd1963.c (ssd1963.h)

Funkce této knihovny umožňují komunikovat s řadičem LCD a provádět nastavení všech registrů tohoto obvodu. Nastavováním registrů je možné zapínat a vypínat displej, měnit vlastnosti zobrazení (jas, kontrast, saturaci, natočení obrazu a další). Řadič umožňuje komunikaci v módu 6800 nebo 8080. Tato knihovna je určena pro mód 8080. Komunikace se skládá z 16 datových linek (režim RGB 565) a 5 řídících linek (/RD, /WR, /CS, /RS a /RESET).

Nejdůležitější funkce knihovny pro vykreslení jednoho pixelu je základní funkce pro jakékoliv vykreslování displeje. Součástí knihovny jsou následující funkce.

```
void SSD1963_WriteCommand (unsigned int);
```

Funkce pro zápis instrukcí na sběrnici.

```
void SSD1963_WriteData (unsigned int);
```

Funkce pro zápis dat na sběrnici.

```
void SSD1963_GPIO_Config (void);
```

Funkce pro konfiguraci pinů procesoru pro komunikaci s řadičem.

```
void SSD1963_Init (void);
```

Provádí počáteční nastavení všech registrů řadiče displeje.

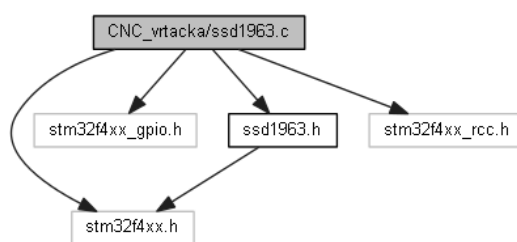
```
void SSD1963_ClearScreen (unsigned long);
```

Smazání displeje (celý displej se vykreslí zvolenou barvou).

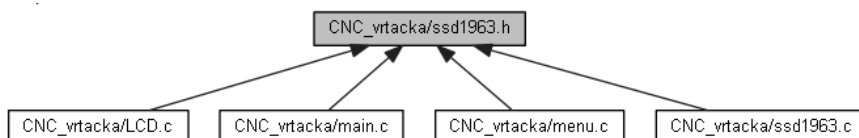
```
void SSD1963_SetPixel (int, int, int);
```

Vykreslení jednoho pixelu na zadaných souřadnicích X, Y zadanou barvou.

Součástí této knihovny jsou opět definice adres registrů, makro pro převod barev z 24 bitové hloubky na 16 bitovou hloubku a definice základních barev používaných v programu.



Obr. 5.7 Hlavičkové soubory volané z ssd1963.c.



Obr. 5.8 Soubory využívající hlavičkový soubor ssd1963.h.

## LCD.c (LCD.h, font.h)

V této knihovně nalezneme funkce pro vykreslení vertikální, horizontální a obecné přímky, kružnice, čtverce, čtverce s kulatými rohy apod. Nejdůležitější jsou funkce pro vypsání textu a vykreslení tlačítka na displej. Pro možnost zobrazování textu jsou v souboru font.h uloženy definice čtyř druhů písma Arial (velikost 12, 14, 16, 18). Součástí definic písmen je uložená hodnota výšky fontu a šířky jednotlivých písmen pro konstantní vzdálenost písmen ve vypsáném textu.

```
unsigned char GLCD_PrintChar (unsigned char, font_t,...);
```

Funkce pro vykreslení jednoho písmene.

```
void GLCD_PrintTextLeft (char*, font_t, uint16_t, uint16_t,...);
```

Vypsání textu se zarovnáním vlevo.

```
void GLCD_PrintTextRight (char*, font_t, uint16_t, uint16_t,...);
```

Vypsání textu se zarovnáním vpravo.

```
void GLCD_PrintTextCenter (char*, font_t, uint16_t, uint16_t,...);
```

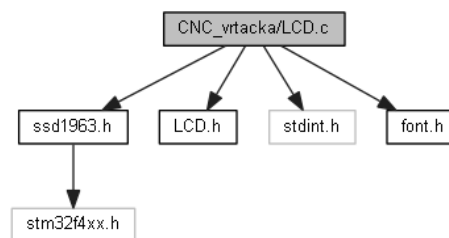
Vypsání textu se zarovnáním na střed.

```
void GLCD_PrintTextCenterXY (char*, char*, uint8_t, font_t,...);
```

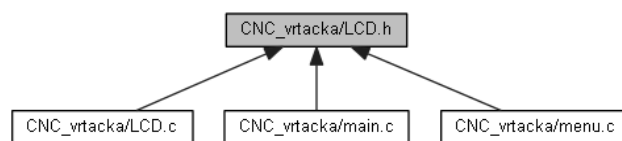
Vypsání textu se zarovnáním na střed v obou osách.

```
void GLCD_Button (char*, char*, uint8_t, font_t,...);
```

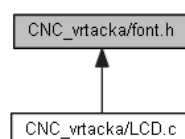
Zobrazení tlačítka na displeji se zadaným popisem.



Obr. 5.9 Hlavičkové soubory volané z LCD.c.



Obr. 5.10 Soubory využívající hlavičkový soubor LCD.h.



Obr. 5.11 Soubory využívající hlavičkový soubor font.h.

### max11802.c (max11802.h)

Pro možnost snímání polohy dotyku z rezistivní vrstvy slouží knihovna pro komunikaci s řadičem max11802.c. Tento obvod komunikuje s mikrokontrolérem prostřednictvím SPI rozhraní. Součástí komunikace je linka generující přerušení při dotyku displeje. Tím je ve spolupráci s externím přerušením dosaženo okamžité reakce na povely uživatele.

```
void MAX11802_SPI_Config (void);
```

Funkce pro nastavení parametrů SPI rozhraní pro komunikaci s obvodem MAX11802.

```
void MAX11802_Init (void);
```

Provádí počáteční nastavení řadiče dotkové vrstvy MAX11802.

```
void MAX11802_WriteCommand (uint8_t, uint8_t);
```

Slouží pro zápis hodnoty do zvoleného registru.

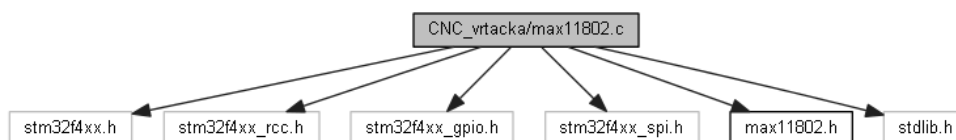
```
uint16_t MAX11802_ReadCommand (uint8_t);
```

Slouží pro čtení hodnoty ze zvoleného registru.

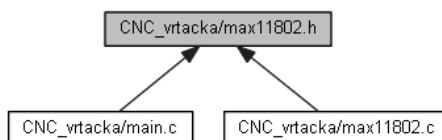
```
uint32_t MAX11802_DetectPosition (void);
```

Vrací souřadnice stlačeného místa (přepočítáno na pixely).

V souboru max11802.h jsou uloženy adresy registrů a je zde definována velikost displeje v pixelech.



Obr. 5.12 Hlavičkové soubory volané z max11802.c.



Obr. 5.13 Soubory využívající hlavičkový soubor max11802.h.

### menu.c (menu.h)

Tuto knihovnu tvoří pět funkcí pro vykreslování pěti základních listů menu. Funkce této knihovny především využívají funkce knihovny LCD.c.

```
void DisplayMenuAut (void);
```

Zobrazení menu pro automatický režim.

```
void DisplayMenuMan (void);
```

Zobrazení menu pro manuální režim.

```
void DisplayDrillTable (void);
```

Zobrazování menu pro možnost listování a editaci v seznamu souřadnic vrtaných děr.

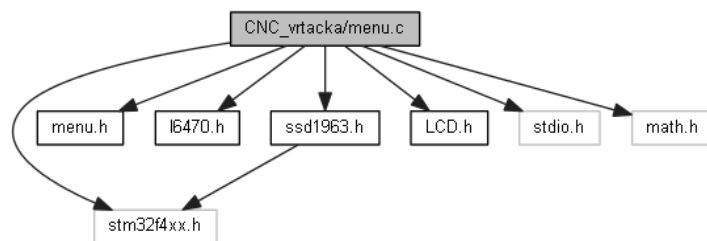
```
void DisplayMotorSettings (void);
```

Výpis nastavení registrů obvodu L6470 pro všechny osy.

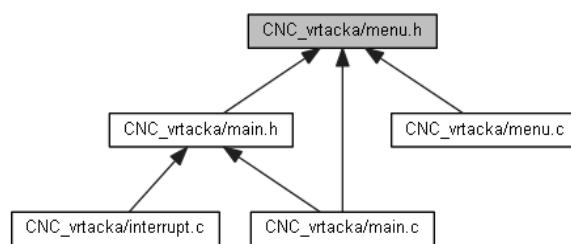
```
void DisplayMotorStatus (void);
```

Výpis Status registru (chybová hlášení a stavy řadičů) pro všechny osy.

V souboru menu.h jsou také napsána makra pro převod desetinných čísel na číslo celé, desetiny, setiny, tisíce a desetitisíce.



Obr. 5.14 Hlavičkové soubory volané z menu.c.



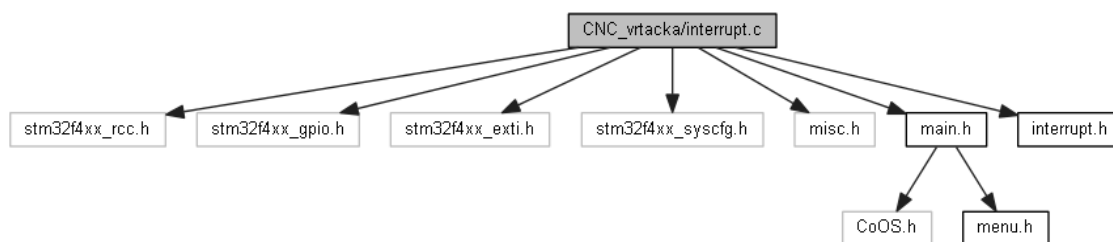
Obr. 5.15 Soubory využívající hlavičkový soubor menu.h.

### interrupt.c (interrupt.h)

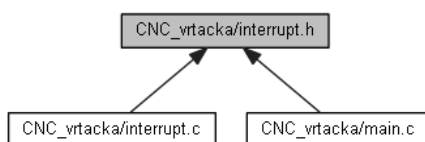
Všechny funkce pro obsluhu přerušení a konfiguraci vstupů pro přerušení jsou v souboru interrupt.c. Konkrétně bylo využito šest vnějších přerušení (tab. 5.1).

```
void EXTI_Line_Config (void);
```

Konfigurace vstupních pinů pro všech šest přerušení.



Obr. 5.16 Hlavičkové soubory volané z interrupt.c.



Obr. 5.17 Soubory využívající hlavičkový soubor interrupt.h.

Tab. 5.1 Přehled externích přerušení procesoru.

Přerušení	Použití
EXTI1	Tlačítko Central stop
EXTI2	Dotyková vrstva LCD
EXTI3	Rotační kodér 1 (Osa X)
EXTI4	Rotační kodér 2 (Osa Y)
EXTI5	Rotační kodér 3 (Osa Z)
EXTI6	Rotační kodér 4 (Otáčky vřetena, Průměr vrtáku)

### **relay.c (relay.h)**

Pro možnosti spínání relé pro LED osvětlení, spínání vřetena a ovládání sirénky byly vytvořeny funkce, tvořící knihovnu relay.c.

```
void Relay_Config (void);
```

Nastavení výstupních pinů mikrokontroléru pro ovládání relé a sirénky.

```
void Relay_SpindleOn (void);
```

Zapnutí vřetena.

```
void Relay_SpindleOff (void);
```

Vypnutí vřetena.

```
void Relay_SpindleToggle (void);
```

Inverze stavu relé vřetena.

```
void Relay_LightOn (void);
```

Zapnutí LED osvětlení.

```
void Relay_LightOff (void);
```

Vypnutí LED osvětlení.

```
void Relay_LightToggle (void);
```

Inverze stavu relé LED osvětlení.

```
void Relay_BEEPOn (void);
```

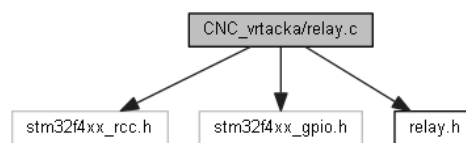
Zapnutí sirénky.

```
void Relay_BEEOff (void);
```

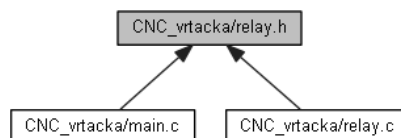
Vypnutí sirénky.

```
void Relay_BEEP (void);
```

Chvilkové zapnutí sirénky – pípnutí.



Obr. 5.18 Hlavičkové soubory volané z relay.c.



Obr. 5.19 Soubory využívající hlavičkový soubor relay.h.

## 5.4 Program mikrokontroléru – soubor main

Za účelem ukládání souřadnic pro vrtání je ve funkci main alokováno potřebné paměťové místo. Po startu zařízení jsou v tabulce uloženy souřadnice pouze jednoho bodu (nulový bod).

Pro celkové řízení programu byl vytvořen systém reálného času (RTOS). Tento systém tvoří 12 tasků. Ty jsou vytvořeny ve funkci main. Pro možnost synchronizace jsou použity 2 mutexy, 11 flagů a pro komunikaci mezi tasky 6 mailboxů. Všechny deklarace proměnných potřebné pro vytvoření všech mutexů, tasků, flagů a mailboxů jsou v souboru main.h. Níže jsou stručně popsány vlastnosti jednotlivých tasků a popis funkce ovládacího programu pro jednotlivé listy menu (popis a volání jednotlivých tasků, použití flagů a semaforů).

### **taskCentralStop**

Tento task je spuštěn pomocí tlačítka umístěného na panelu ovládací části. Vstup pro tlačítko je konfigurován jako vstup externího přerušení EXTI1 a slouží k okamžitému zastavení stroje. V obsluze přerušení je nastaven `flagCentralStop` pomocí kterého je následně spuštěn tento task. Po spuštění tasku je zastaveno vřetení, všechny tři osy a smyčka pro automatické vrtání.

### **taskBeep**

Task pro potvrzovací tón při dotyku tlačítka displeje.

### **taskManAxisX, taskManAxisY, taskManAxisZ**

Pro ovládání motorů všech os pomocí rotačních kodérů, generujících přerušení (EXTI3, EXTI4 a EXTI5), jsou určeny tři samostatné tasky (`taskManAxisX`, `taskManAxisY`, `taskManAxisZ`) spouštěné pomocí třech flagů (`flagManAxisX`, `flagManAxisY`, `flagManAxisZ`). V obsluze přerušení každého z kodérů je nastaven příslušný flag, určí se směr otáčení kodéru a stav tlačítka hřídele. Zjištěné hodnoty jsou odeslány pomocí mailboxů (`mailbox_AxisX`, `mailbox_AxisY`, `mailbox_AxisZ`) příslušnému tasku. Po vykonání obsluhy přerušení se spustí task pro odpovídající motor, kde se podle přijatých dat zvolí směr a rychlost pojezdu. Pro manuální polohování je využit režim krokování. Na vstup STCK obvodu L6470 je přiveden obdélníkový signál, který řídí krokování motoru.

### **taskManSpindle**

Poslední z rotačních kodérů, rovněž generující přerušení (EXTI6), spouští pomocí flagu `flagManSpindle` tento task. V přerušení je nastaven flag a opět jsou tasku odeslány informace o směru otáčení a stavu tlačítka pomocí mailboxu (`mailbox_Spindle`). V obsluze tasku se pomocí přijatých dat rozhodne o následujícím postupu. Není-li tlačítko stisknuto, nastavuje se požadovaný průměr vrtáku pro automatické vrtání. Nastavení je umožněno v kroku po 0,01 mm. Je-li tlačítko stisknuto, mění se manuálně otáčky vřetení. Změna otáček je v kroku 10 %. Jak již bylo uvedeno, regulace otáček zatím není umožněna, ale je programově podporována. V budoucnu bude zapojení doplněno o regulátor. Jsou-li otáčky nastaveny na více, jak 0 %, je sepnuto relé vřetení.



### **taskCoordinatesMan**

Slouží pro neustálé zobrazování souřadnic všech os a otáček vřetena. Tento task je využíván pouze v Manuálním režimu. Souřadnice pro jednotlivé osy jsou získány čtením registru z obvodů L6470. V tomto registru je uložena absolutní poloha motoru, která je při pohybu neustále obnovována. Otáčky motoru jsou uloženy v paměti procesoru.

### **taskCoordinatesAut**

Tento task je obdobou předchozího tasku. Jediným rozdílem je, že je využíván pouze pro Automatický režim vrtání a kromě zmíněných souřadnic a otáček vřetena vypisuje na displej také zvolený průměr vrtáku pro automatické vrtání, který je také uložen v procesoru.

### **taskLCD**

Speciální vývod řadiče dotykové vrstvy za přítomnosti dotyku generuje externí přerušení (EXTI2). V jeho obsluze je nastaven flag (`flagLCD`) a ten spustí tento task. Na začátku jsou zjištěny souřadnice dotyku na displeji. Podle zjištěných souřadnic se provede buď změna menu displeje, nebo se provede obsluha tlačítek zobrazených na displeji (individuální pro každý list). Vykreslení jednoho z pěti menu a spuštění nebo zastavení odpovídajících tasků se provede, pokud souřadnice dotyku odpovídají souřadnicím některé záložce z horní části displeje. Pokud souřadnice přísluší jiné části displeje, provede se případná obsluha tlačítek odpovídajících právě zobrazenému menu.

Je-li na displeji zobrazeno menu pro zadávání dat (Drill Table) a je stisknuto tlačítko Load data, je pomocí flagu spuštěn `taskUSB`. Ten se postará o přenos a uložení dat. Pokud je v tomto listu menu stisknuto jakékoliv jiné tlačítko, je pomocí flagu (`flagDrillTable`) spuštěn `taskDrillTable`. Tomuto tasku jsou také odeslány souřadnice dotyku displeje. K tomu jsou použity dva mailboxy (`mailbox_TouchX` a `mailbox_TouchY`). Veškerá modifikace dat je prováděna prostřednictvím `taskDrillTable`.

### **taskDrillTable**

Tento task byl vytvořen za účelem možnosti ruční editace a modifikace zadaných dat. Task je spuštěn pomocí `flagDrillTable` z tasku pro obsluhu LCD. Data pro vrtání je možné nahrát prostřednictvím USB rozhraní a následně je upravovat, nebo je možné všechny data zadat ručně. Pro možnosti vytvoření a změny dat jsou na displeji zobrazeny tlačítka New, Modify, Delete a numerická klávesnice. Veškeré změny parametrů jsou prováděny pro aktuálně zobrazená data. Nastavovaný parametr je zvýrazněn. Součástí tasku je také výpis zadávaných parametrů na displej a následné uložení dat do tabulky děr. Maximální počet vrtaných děr a počet vrtáků je možné nastavit pomocí definic v souboru `main.h`.

### **taskAutDrill**

Po spuštění tlačítka pro automatické vrtání Start je postupně procházena tabulka s uloženými souřadnicemi děr. Nastane-li shoda průměru vrtáku uloženého v tabulce

s průměrem aktuálně nastaveným, zapne se vřeteno a souřadnice z tabulky jsou použity pro vrtání. Požadované souřadnice z tabulky jsou zobrazeny v pravé části displeje, zatímco aktuální souřadnice jsou zobrazeny v levé části LCD. Před najetím os X a Y je zkontrolováno, zda je osa Z v nulové pozici. Pokud je tato podmínka splněna, jsou použity souřadnice os X a Y pro najetí do požadované polohy. Po najetí os do zadaných pozic jsou zkontrolovány skutečné souřadnice (pomocí čtení registrů absolutní polohy obvodů L6470). Jsou-li skutečné hodnoty shodné s tabulkovými hodnotami je umožněno vrtání podle uložené souřadnice osy Z. Vrtání probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku se přiblíží nástroj těsně nad DPS (rychlejší posuv) a v druhém kroku je vyvrtána díra (pomalejší posuv). Po vyvrtání se vrátí osa Z do nulové polohy (stejná rychlost v celé dráze). Poloha se poté ověří a je-li Z opravdu v nulové poloze, opakuje se postup uvedený výše, dokud nejsou vyvrtány všechny díry požadovaného průměru.

Po vyvrtání všech děr zvoleného průměru se na displeji zobrazí nápis Drilled. Pokud nastavenému průměru vrtáku nevyhovuje žádná díra z tabulky, zobrazí se nápis No hole of set diameter. Poté je vypnuto vřeteno a stroj najede do pozice  $X = 0$  mm,  $Y = 0$  mm a  $Z = 30$  mm pro možnost snazší výměny nástroje

#### **taskUSB**

Nahrávání dat přes USB je možné provést v menu Drill table po stisku tlačítka Load data. V obsluze tlačítka je nastaven `flagUSB1`, který spustí `taskUSB`. Na displeji se zobrazí nápis Waiting for data from PC. Poté se čeká na příchozí data. Každý příchozí paket je signalizován pomocí `flagUSB2`. Po nastavení flagu se určí typ přijatých dat. Prvním typem jsou data pro seznam vrtáků. Tyto data jsou doručena jako první. Následuje druhý typ dat pro výběr vrtáku ze seznamu (zvolí se průměr nástroje pro následně zadávaná data). Třetí typ dat tvoří souřadnice děr. Čtvrtým typem je ukončovací řádek. Formát dat generovaných programem Eagle je popsán v kapitole 5.6.

Podle typu přijatých dat se provádí ukládání parametrů děr a nástrojů do paměti. Jelikož jsou v programu Eagle generována data, které obsahují pouze souřadnic os X, Y a průměr vrtáku, jsou souřadnice osy Z a otáčky vřetena nastaveny defaultně podle definovaných hodnot v souboru `main.h` ( $Z = -10$  mm, otáčky vřetena 100 %). Postup ukládání se opakuje, dokud není přijat ukončovací řádek. Po přijetí všech dat jsou na displeji zobrazeny parametry první díry.

Některé z výše uvedených tasků je možné spustit ve všech pěti listech menu, zatímco jiné lze spustit jen v některém zobrazení. Možnosti spouštění tasků pro jednotlivé listy menu zobrazuje obr. 5.20. Tasky `taskCoordinatesAut` a `taskCoordinatesMan` se spouštějí automaticky. Automatické spouštění a případné blokování jiných tasků je provedeno v obsluze tlačítek pro změnu zobrazeného menu. Ostatní z tasků jsou spouštěny podmíněně. Podmínky pro spuštění jsou uvedeny v závorkách pod názvem příslušného tasku.

Priorita	Automatic	Manual	Drill Table	Mot. Settings	Mot. Status
6	taskCoordinatesAut	taskCoordinatesMan			
5	taskAutDrill (tlačítko Start / Stop)		taskUSB (voláno z taskLCD)		
4	taskManSpindle (rotační kodér)	taskManAxisX taskManAxisY taskManAxisZ taskManAxisSpindle (rotační kodéry)			
3			taskLCD (start při dotyku LCD)		
2			taskDrillTable (voláno z taskLCD)		
1			taskBeep (voláno z taskLCD při dotyku LCD)		
0			taskCentralStop (start při stisku tlačítka Central stop)		

Obr. 5.20 Spouštění tasků v závislosti na zobrazeném menu.

## 5.5 Uživatelské rozhraní

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, menu ovládání přístroje tvoří pět různých listů menu (pro pět různých režimů). Je to menu pro automatický režim, manuální režim, menu pro zadávání dat, zobrazení nastavení motorů a výpis Status registru motorů. Níže budou jednotlivé listy menu popsány:

### Automatický režim

Tento režim slouží pro automatické vrtání podle zadaných souřadnic v tabulce děr (obr. 5.21). Po nastavení průměru vrtáku jsou pro automatické vrtání vybrány všechny díry z tabulky se shodným průměrem. V levé části displeje je možné sledovat aktuální souřadnice a v pravé části jsou požadované souřadnice pro vrtání (souřadnice z tabulky pro aktuálně vrtanou díru).



Obr. 5.21 Menu pro automatický režim.

Drill Up	Zvětšení průměru vrtáku (+0,01mm).
Drill Down	Zmenšení průměru vrtáku (-0,01mm).
Start	Spuštění automatického vrtání.
Stop	Zastavení automatického vrtání.
Central Stop Unblock	Odblokování po stisku Central Stop.
Central Stop	Okamžité zastavení stroje (stejně jako tlačítko na panelu).
Go To Zero Position	Všechny osy se vrátí do nulového bodu.
Change Drill	Odjetí osy Z pro snazší výměnu vrtáku.
New Zero Position	Nový nulový bod, osa Z +7 mm.
Light	Zapnutí / vypnutí LED osvětlení stroje.

## Manuální režim

Pro možnost manuálního ovládání stroje byl vytvořen manuální režim (obr. 5.22). V tomto režimu je možné všechny tři osy stroje ovládat buď pomocí tlačítek displeje, nebo pomocí rotačních kodérů. Manuální režim slouží hlavně k najetí na nulový bod a vyrovnaní desky pro automatické vrtání. Pro hrubé najetí slouží tlačítka displeje (rychloposuv) a pro jemné nastavení jsou určeny rotační kodéry (k dispozici jsou dvě rychlosti posuvu v závislosti na stisku rotačního kodéru). Manuálně je také možné ovládat otáčky vřetena. Aktuální souřadnice a otáčky jsou zobrazeny vlevo na displeji.



Obr. 5.22 Menu pro manuální režim.

+X	Rychloposuv osy X do kladných hodnot.
STOP	Zastavení rychloposuvu osy X.
-X	Rychloposuv osy X do záporných hodnot.
+Y	Rychloposuv osy Y do kladných hodnot.
STOP	Zastavení rychloposuvu osy Y.
-Y	Rychloposuv osy Y do záporných hodnot.
+Z	Rychloposuv osy Z do kladných hodnot.
STOP	Zastavení rychloposuvu osy Z.
-Z	Rychloposuv osy Z do záporných hodnot.
Spindle Up	Zvýšení otáček vřetena o 10 %.
Start/Stop	Zastavení / spuštění vřetena.
Spindle Down	Snížení otáček vřetena o 10 %.
Zero Position	Nový nulový bod.
Go to Zero Position	Všechny osy se vrátí do nulového bodu.
Light	Zapnutí / vypnutí osvětlení stroje.

## Režim pro zadávání dat

Data pro vrtání je možné zadávat buď manuálně pomocí zobrazených tlačítek a numerické klávesnice nebo je možné data nahrát přes USB rozhraní. Nahraná data je rovněž možné jakkoliv upravovat. Uložená data (souřadnice, průměr vrtáku a otáčky včetně) pro aktuálně vybranou díru ze seznamu jsou zobrazena v levé části displeje (obr. 5.23). Veškeré úpravy dat jsou prováděny pro aktuálně zobrazenou díru kde je upravovaný parametr zvýrazněn oranžovou barvou.



Obr. 5.23 Menu pro zadávání dat.

<<	Tlačítko pro listování v seznamu vrtaných děr, předchozí díra.
>>	Tlačítko pro listování v seznamu vrtaných děr, následující díra.
New	Nová díra pro vrtání, vytvoří paměťové místo pro nové souřadnice.
Modify	Změna kteréhokoliv parametru (souřadnice, průměr vrtáku, otáčky včetně) pro vybranou a aktuálně zobrazenou díru.
Delete	Smazání aktuálně zobrazené díry.
Load data	Po stisku tohoto tlačítka je možné nahrát data přes USB.
^	Listování v uložených parametrech pro aktuálně zobrazenou díru, nahoru.
v	Listování v uložených parametrech pro aktuálně zobrazenou díru, dolů.
Enter	Potvrzení nové hodnoty po změně parametru.
Clear	Smazání nové hodnoty a vrácení původní hodnoty parametru.
Klávesnice	Aktivní pouze po stisku tlačítka Modify, slouží pro zadání všech parametrů při ručním zadávání dat a změně parametrů.



### Zobrazení nastavení motorů

V tomto listu menu jsou vypsány nastavené hodnoty registrů řadičů L6470 pro všechny tři osy (obr. 5.24).

Automatic		Manual		Drill Table		Mot. Settings		Mot. Status	
Motor settings		AXIS X		AXIS Y		AXIS Z			
ACC	[step/s <sup>2</sup> ]	3724.800		3724.800		3724.800			
DEC	[step/s <sup>2</sup> ]	3724.800		3724.800		3724.800			
MAX SPEED	[step/s]	625.250		625.250		610.000			
MIN SPEED	[step/s]	0.000		0.000		0.000		OFF	
FS SPD	[step/s]	3896.379		3896.379		3896.379			
KVAL HOLD	[%]	1.562		1.562		1.562			
KVAL RUN	[%]	12.890		12.890		12.890			
KVAL ACC	[%]	11.328		11.328		11.328			
KVAL DEC	[%]	11.328		11.328		11.328			
INT SPEED	[step/s]	155.615		155.615		155.615			
ST SLP	[% s/step]	0.033		0.033		0.033			
FN SLP ACC	[% s/step]	0.147		0.147		0.147			
FN SLP DEC	[% s/step]	0.147		0.147		0.147			
OCD TH	[A]	2.250		2.250		2.250			
STALL TH	[A]	2.093		2.093		2.093			

Obr. 5.24 Zobrazení nastavení motorů.

### Výpis Status registrů

Veškerá chybová hlášení a zásahy použitých ochran všech tří řadičů L6470 zjištěná ze Status registru je možné sledovat v tomto listu menu (obr. 5.25).

Automatic		Manual		Drill Table		Mot. Settings		Mot. Status	
Motor Status		AXIS X		AXIS Y		AXIS Z			
Step Clock Mode		Normal Mode		Normal Mode		Normal Mode			
Step Loss Bridge B		OK		OK		OK			
Step Loss Bridge A		OK		OK		OK			
Overcurrent Detection		OK		OK		OK			
Thermal Shut Down		OK		OK		OK			
Thermal Warning		OK		OK		OK			
Undervoltage Lockout		OK		OK		OK			
Wrong Command		OK		OK		OK			
Not Performed Command		OK		OK		OK			
Motor Status		Stopped		Stopped		Stopped			
Direction		Backward		Backward		Forward			
Switch Event		-		-		-			
Switch Flag		SW Open		SW Open		SW Open			
Busy		-		-		-			
High Impedance		-		-		-			

Obr. 5.25 Výpis Status registrů.

## 5.6 Nahrávání dat přes USB

Pohodlnějším a rychlejším způsobem oproti ručnímu zadávání dat je nahrání souřadnic pomocí rozhraní USB. Data jsou generována CAM procesorem programu Eagle ve kterém jsou navrhovány DPS. Pro komunikaci byl vytvořen specifický formát dat. Pro možnost jeho generování bylo nutné doplnit soubor eagle.def o následující kód:

```
[CNC_METRIC]

Type = DrillStation
Long = "Excellon drill station (metric units)"
Init = "\n" ; "%\n" \
        ; "M48\n" \
        ; "M71\n"

Reset = "\nWR 00 FF FF 00 00 00 00 00 00\n"
ResX = 2540
ResY = 2540
; Rack = ""
DrillSize = "WR 00 %s EE %07.2f\n" ; (Tool code, tool size)
AutoDrill = "EE %02d" ; (Tool number)
FirstDrill = 1
BeginData = "\n" ; "%\n"
Units = mm
Decimals = 2
Select = "\nWR 00 %s FF FF FF FF FF FF FF\n" ; (Drill code, tool size)
Drill = "WR 00 AA %06.0f BB %06.0f FF\n" ; (x, y)
Info = "Drill File Info:\n" \
"\n" \
" Data Mode : Absolute\n" \
" Units : 1/100 mm\n" \
"\n"
```

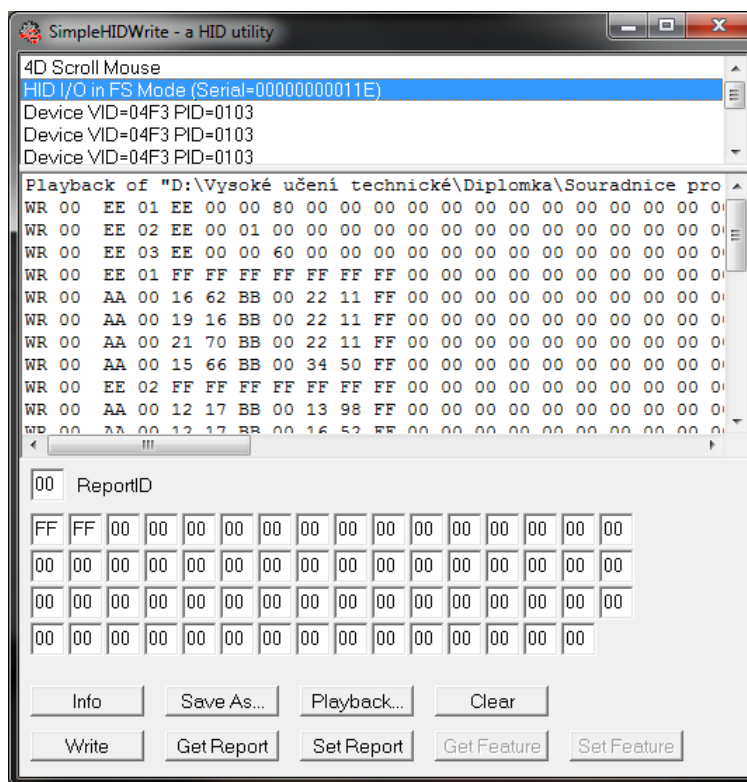
Kód pro generování dat vychází z kódu EXCELLON. Souřadnice jsou zde ale generovány v metrických jednotkách. Výstupní data procesoru je nutné zkopírovat do souboru s koncovkou .txt. Po drobných úpravách je formát dat následující:

WR 00 EE 01 EE 00 00 80	Vrták č.1, Ø = 0,80mm
WR 00 EE 02 EE 00 01 00	Vrták č.2, Ø = 1,00mm
WR 00 EE 03 EE 00 00 60	Vrták č.3, Ø = 0,60mm
WR 00 EE 01 FF FF FF FF FF FF FF	Použití vrtáku č.1
WR 00 AA 00 16 62 BB 00 22 11 FF	X=16,62mm a Y=22,11mm, Ø=0,80mm
WR 00 AA 00 19 16 BB 00 22 11 FF	X=19,16mm a Y=22,11mm, Ø=0,80mm
WR 00 EE 02 FF FF FF FF FF FF FF	Použití vrtáku č.2
WR 00 AA 00 12 17 BB 00 13 98 FF	X=12,17mm a Y=13,98mm, Ø=1,00mm
WR 00 AA 00 12 17 BB 00 16 52 FF	X=12,17mm a Y=16,52mm, Ø=1,00mm
WR 00 EE 03 FF FF FF FF FF FF FF	Použití vrtáku č.3
WR 00 AA 00 21 70 BB 00 22 11 FF	X=21,70mm a Y=22,11mm, Ø=0,60mm
WR 00 AA 00 19 16 BB 00 22 11 FF	X=19,16mm a Y=22,11mm, Ø=0,60mm
WR 00 FF FF 00 00 00 00 00 00	Řádek pro ukončení zasílání dat.



Pro odesílání dat procesoru přes USB je použita třída USB HID. Velkou výhodou je, že HID je součástí Windows. Po připojení tudíž není potřeba instalovat žádné ovladače. Nevýhodou této třídy je pomalý přenos dat. Jelikož nejsou data nesoucí souřadnice pro vrtání velkých objemů, lze tuto třídu s výhodou snadné implementace použít. Jako návod pro použití USB byly použity internetové stránky [40] a jako vzorový projekt, ze kterého byly také použity knihovny pro USB HID, byl použit projekt dostupný na stránkách [41].

Pro samotné odeslání dat je použit program SimpleHIDWrite (obr. 5.26) dostupný z [42]. Po zapnutí programu zvolíme v horní části zařízení HID I/O in FS Mode. Následně na ovládacím panelu stroje stiskneme v zobrazení Drill table tlačítko Load data a v programu SimpleHIDWrite po stisku tlačítka Playback zvolíme soubor k odeslání. Po přijetí dat se ozve potvrzovací tón a na displeji se zobrazí parametry první díry. Pomocí tohoto programu je možné data také ze zařízení přijímat. Tato možnost však není zatím využita.



Obr. 5.26 Ukázka komunikace programu SimpleHIDWrite.

## 6 KALIBRACE A VLASTNOSTI STROJE

Po sestavení, naprogramování a prvotním otestování CNC vrtačky se ukázalo, že při polohování vřetena vznikají nepřesnosti. Nepřesnost najíždění na zadané souřadnice vzrůstaly se vzdáleností od nulového bodu. Po následném testování a měření bylo zjištěno, že nepřesnosti jsou chybou mechanické a ne elektrické části. Ukázalo se, že stoupání šroubu není přesně 4 mm. Proto bylo nutné upravit v souboru main.h konstanty stoupání šroubů.

Skutečné hodnoty stoupání byly zkušebně zjištěny měřením za pomoci úchylkoměru a broušených měrek a také najížděním hrotu na kalibrační desku. Zkušební desku lze včetně potřebných souřadnic nalézt v příloze G.2 a G.3. Nejlepší přesnosti najíždění bylo dosaženo pro stoupání šroubu 4.0220 mm pro osu X, 4.0190 mm pro osu Y a 3.0034 mm pro osu Z.

Dosažené přesnosti všech os jsou uvedeny v následujících tabulkách. Tab. 6.1 udává odchylky najetí do zadané polohy, kdy je smysl otáčení motoru při najíždění do prvního a do druhého bodu stejný. Tab. 6.2 ukazuje nepřesnosti, kdy při najíždění do prvního a do druhého bodu dojde ke změně smyslu otáček. Údaje tedy zahrnují vůli v maticích při změně otáček. Tab. 6.3 zobrazuje vůle v maticích všech os při změně smyslu otáčení krokových motorů.

Tab. 6.1 Odchylky skutečné a požadované polohy při najíždění ze stejného směru.

Osa	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm
X	0,01 mm	0,04 mm	0,05 mm	-	-
Y	0,03 mm	0,04 mm	0,04 mm	0,15 mm	0,25 mm
Z	0,01 mm	0,01 mm	-	-	-

Tab. 6.2 Odchylky skutečné a požadované polohy při najíždění z opačného směru.

Osa	50 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm
X	0,05 mm	0,07 mm	0,08 mm	-	-
Y	0,01 mm	0,03 mm	0,09 mm	0,20 mm	0,30 mm
Z	0,02 mm	0,03 mm	-	-	-

Tab. 6.3 Vůle v maticích pojezdů při změně směru posuvu a dělení posuvů os.

Osa	Vůle	Dělení (1 krok)
X	0,01 mm	0,01 mm
Y	0,01 mm	0,01 mm
Z	0,025 mm	0,0075 mm

Při testování stroje bylo zjištěno, že možnosti elektronické části stroje předčí mechanickou konstrukci. Jak je patrné z naměřených odchylek, použití válcovaného trapézového šroubu pro polohování zařízení není nejlepší volba. Tyto šrouby jsou částí, která nejvíce omezuje přesnost polohování. Nepřesnost 0,01 mm ve stoupání šroubu způsobuje nepřesnost 0,25 mm pro lineární posuv 100 mm (pro osy X a Y). Použitím přesnějších šroubů (soustružený trapézový šroub, kuličkový šroub) by bylo možné dosáhnout větší přesnosti.

Po seřízení stroje bylo vrtání stroje vyzkoušeno na několika zkušebních deskách vytvořených v programu Eagle (příloha G.1). Kvůli mechanické konstrukci bylo nutné částečně omezit rychlost posuvů. Pro představu rychlosti vrtání byl změřen čas vrtání desky zdrojů pro napájení ovládání (76 děr na ploše 195 x 90 mm, příloha A.2). Pro relevantnost údajů byly při vrtání všechny průměry děr nastaveny na 1 mm (nedochází k výměně nástroje). Pořadí vrtaných děr je dáno programem Eagle. Pro vrtání je třeba čas asi 6 min. 30 sec.

Skutečné vlastnosti pojezdů shrnuje tabulka tab. 6.4. Jsou zde uvedeny délky všech os. Tyto délky jsou o něco menší než hodnoty uvedené v tab. 2.1 (podkapitola 2.4). Je to z důvodu měření mezi koncovými spínači. Pro nastavené maximální otáčky motoru je zde uveden čas potřebný pro přejetí osy (ve skutečnosti se čas může lišit podle nastavené akcelerace a decelerace).

Tab. 6.4 Skutečné vlastnosti jednotlivých os stroje.

Osa	Délka osy	Čas pro přejetí	Rychlost osy	Otáčky motoru
X	200,80 mm	16,06 s	12,5 mm/s	3,126 ot/s
Y	283,54 mm	22,68 s	12,5 mm/s	3,126 ot/s
Z	146,79 mm	15,96 s	9,2 mm/s	3,050 ot/s

I když není možné z mechanických důvodů dosáhnout maximálních rychlostí pojezdů, je vrtání desek ve srovnání s ručním vrtáním poměrně rychlé. Výhody strojního vrtání nejvíce vyniknou při vrtání více stejných desek. Ty je možné umístit na jednu desku a po vyrovnání desky pouze měnit nulové body.

## 7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout CNC stroj pro vrtání DPS. Před započítím samotné práce na projektu bylo nutné nastudovat a promyslet možnosti konstrukčního řešení stroje. Pro účel CNC vrtání byla vybrána tříosá konstrukce s pohyblivým portálem. Pro výrobu většiny částí stroje byl použit dural. Pojezdové mechanismy jsou vyrobeny z oceli. Rozsah pojezdů je asi 200 x 283 x 146 mm, což víceméně odpovídá požadavkům kladené na stroj. Na CNC vrtačku nebyly použity téměř žádné komerčně dostupné díly. Kromě motorů, vřetena, ložisek a pružných spojek jsou všechny části vyrobeny svépomocí. To vedlo k velké časové náročnosti výroby vrtačky. Výroba mechanické části zabrala asi čtyři měsíce každodenní práce. Strojní opracování bylo provedeno podle hrubých náčrtů na papír a v podstatě neexistuje kompletní výkresová dokumentace. Tu by bylo možné doplnit zpětně. Jelikož hlavní částí této práce je elektrická a programová část stroje, nebylo možné z časových důvodů dokumentaci zhotovit.

Všechny tři osy jsou poháněny krokovými motory NEMA23 s krouticím momentem 1,89 Nm. Krokové motory byly zvoleny kvůli možnosti absence kodérů pro zpětnou vazbu. Tu je možné vynechat při zajištění dostatečného krouticího momentu motoru. Použité vřeteno je o příkonu 160 W s možností regulace otáček v rozsahu 15000 – 35000 ot/min. Otáčky je zatím možné měnit pouze na těle vřetena, ale do budoucna je počítáno s regulací pomocí procesoru (v programu je nastavování otáček již podporováno a na řídicí DPS jsou za tímto účelem vyvedeny čtyři běžné výstupy a dva výstupy z D/A převodníků).

Pro sestavené zařízení byla blokově navržena koncepce elektronické části. O celkové řízení všech procesů se stará 32 bitový procesor ARM STM32F407VG. Tento procesor generuje povely a prostřednictvím obvodů L6470 řídí všechny tři motory. Pro komunikaci s uživatelem je použit 7“ TFT displej s rezistivní dotykovou vrstvou. Kromě automatického režimu zařízení umožňuje i režim manuální, kdy jsou pohyby všech os ovládány ručně rotačními kodéry. Pro odzkoušené zařízení byly navrženy tři desky DPS.

V rámci tvorby ovládacího programu pro procesor byly nejprve vytvořeny v jazyce C knihovny pro komunikaci s obvodem L6470, MAX11802, SSD1963 a knihovna pro vykreslování objektů na LCD displeji. Knihovna pro obvod L6470 umožňuje prostřednictvím povelů přes SPI rozhraní ovládat krokové motory. Hlavní funkce knihovny MAX11802 vrací, rovněž přes rozhraní SPI, souřadnice pixelu odečtené při dotyku z rezistivní dotykové vrstvy. Zobrazování na displeji je umožněno pomocí knihovny pro řadič LCD displejů SSD1963 a knihovny s funkcemi pro vykreslení jednoduchých grafických prvků. Součástí této knihovny je také definice základních barev a definice čtyřech velikostí písma. Konkrétně se jedná o písmo Arial o velikosti 12, 14, 16 a 18. Pro vytvoření funkce main byl použit operační systém reálného času CoOS (součástí prostředí CoIDE). Funkci tvoří 12 tasků (např. task pro automatické vrtání, pro nahrávání dat přes USB, pro ovládání displeje). Pro synchronizaci tasků jsou použity mutexy, flagy a pro předávání informací mezi tasky mailboxy.

Po osazení, oživení všech desek a naprogramování byly všechny části společně se zdrojem zamontovány do navržené krabice. Propojení ovládání a stroje je realizováno

šesti konektory. Hotové zařízení bylo seřízeno a testováno na zkušebních deskách.

Při testování bylo zjištěno, že maximální rychlost pojezdů zdaleka nedosahuje vypočtených maximálních hodnot. Rychlost os musela být totiž přizpůsobena mechanické konstrukci a je proto menší, než teoretická hodnota. Po úpravách a vylepšení bude v budoucnu možné dosáhnout vyšších hodnot rychlostí. Dělení (posuv pro jeden krok) je pro osu X a Y 0,01mm a pro osu Z 0,0075 mm. Dělení os by bylo možné ještě zmenšit použitím mikrokrokování. Poté už ovšem narážíme na přesnost pohybového mechanismu stroje (přesnost polohování motoru převyšuje mechanické vlastnosti stroje). Vůle v trapézových maticích při změně otáček byla změřena úchylkoměrem a činí 0,01 mm pro osu X a Y a 0,025 mm pro osu Z. Největší slabinou stroje jsou trapézové šrouby. Stoupání šroubu pro přepočít v programu je nutné pro přesnost stroje upravit (stoupání není 4,00 mm, ale asi 4,02 mm). Stoupání šroubu se navíc v různých místech liší (nepatrně, kolísání např. o 0,01 mm – tomu odpovídá úchylka 0,25 mm pro posuv 100 mm). Nepřesnosti jsou víceméně tvořeny jenom touto nepřesností. Pro nejdelší osu vznikají chyby do 0,3mm, což by pro desky s malými pájecími plochami mohl být problém. Pro domácí použití je ovšem přesnost dostatečná (desky vyrobené v domácích podmínkách mají větší pájecí plošky). Řešením pro zlepšení parametrů je co nejlepší nastavení stoupání šroubů v programu.

V budoucnu bude práce směřovat k vylepšování mechanických parametrů (rychlost, přesnost) a vylepšování programu mikrokontroléru. Pro vrtání bude doplněna regulace otáček a bude doplněn režim pro frézování.

# LITERATURA

- [1] POLÁŠEK, Jaromír. Číslicově řízené stroje. In: [online]. VOŠ, SOŠ A SOU Kopřivnice, s.81 [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: [http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U31\\_Cislicove\\_rizene\\_stroje.pdf](http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U31_Cislicove_rizene_stroje.pdf)
- [2] MANA, M. *Řídicí systém CNC strojů a možnosti využití*. Bakalářská práce. Brno: FSI VUT v Brně, 2012.
- [3] *CNC - hobby: Stránky o CNC pro volný čas* [online]. [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: <http://cnc-hobby.cz/>
- [4] Lineární vedení. *4ISP* [online]. [cit. 2013-10-13]. Dostupné z: <http://cnc.inshop.cz/Lineární%20vedení%20pro%20CNC/>
- [5] Lineární kluzná ložiska. *Igus* [online]. [cit. 2013-10-13]. Dostupné z: [http://www.igus.cz/wpck/2407/DryLin\\_R\\_Lineargleitlager](http://www.igus.cz/wpck/2407/DryLin_R_Lineargleitlager)
- [6] Ložisko kuličkové lineární. *Arkov* [online]. [cit. 2013-10-13]. Dostupné z: <http://zbozi.arkov.cz/i/62620-lbbr-25-2ls-lozisko-kulickove-linearni-skf.html>
- [7] Otevřené kuličkové pouzdro. *CNC shop* [online]. [cit. 2013-10-13]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/lmop-otevrene-kulickove-pouzdro>
- [8] Trapézové šrouby. *T.E.A. Technik* [online]. [cit. 2013-10-18]. Dostupné z: <http://www.teatechnik.cz/trapezove-srouby-1/>
- [9] Kuličkové šrouby. *AMPO* [online]. [cit. 2013-10-18]. Dostupné z: <http://www.ampo.cz/produkty/pmi-linearni-vedeni/kulickove-srouby>
- [10] Guideway System for Medium Duty Applications. *Güdel AG* [online]. [cit. 2013-10-23]. Dostupné z: <http://local.gudel.com/components/linearfuehrungssysteme/fuehrungssystem-der-mittleren-baureihe/uebersicht/>
- [11] Hřebeny a pastorky. *Rem-Technik* [online]. [cit. 2013-10-23]. Dostupné z: <http://www.rem-technik.cz/pohyb-pohony-prevody/hrebeny-a-pastorky/hrebeny-a-pastorky-58.html>
- [12] Vlastnosti válečkových šroubů. [online]. [cit. 2013-10-24]. Dostupné z: [http://www.epo.cz/stahovani-souboru/doc\\_download/225-02-vlastnosti-valeckovych-sroubu.html](http://www.epo.cz/stahovani-souboru/doc_download/225-02-vlastnosti-valeckovych-sroubu.html)
- [13] Lifting systems. *Machine design & Mechanical Engineering* [online]. [cit. 2013-10-24]. Dostupné z: [http://www.mdme.info/MEMmods/MEM30009A/lifting\\_systems/lifting\\_systems.html](http://www.mdme.info/MEMmods/MEM30009A/lifting_systems/lifting_systems.html)
- [14] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002. ISBN: 80-214-1978-4.
- [15] Stejnoseměrné stroje (motory). [online]. s. 8 [cit. 2013-10-28]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap22.pdf>
- [16] FEDRA, Z. *Mikrokontroléry pro přístrojové aplikace: Prezentace z přednášek*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2013.
- [17] RYDLO, P. *Krokové motory a jejich řízení*. Elektronické skriptum. Liberec: Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií Technická univerzita v Liberci v Liberci, 2000.

- [18] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: Pohony, Senzory, Řízení*. 1. vyd. BEN, 2005, 243 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [19] ŘEZÁČ, Kamil. Krokové motory: Princip funkce, Metody řízení. *Robotika* [online]. 2002 [cit. 2013-11-01]. Dostupné z: <http://robotika.cz/articles/steppers/>
- [20] Lineární motor. *Pohonná technika* [online]. [cit. 2013-11-2]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/linearni-motor>
- [21] STMICROELECTRONICS. *UM1472 User Manual: STM32F4DISCOVERY*. Datasheet, Rev. 2. 2012, 38 s. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user\\_manual/DM00039084.pdf?s\\_searchtype=keyword](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf?s_searchtype=keyword)
- [22] STMICROELECTRONICS. *STM32F407xx: ARM Cortex-M4*. Datasheet, Rev. 4. 2013, 185 s. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf?s\\_searchtype=keyword](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf?s_searchtype=keyword)
- [23] STMICROELECTRONICS. *PM0214 Programming manual: Cortex-M4 Programming manual*. Datasheet, Rev. 3. 2012, 243 s. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/programming\\_manual/DM00046982.pdf?s\\_searchtype=keyword](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/programming_manual/DM00046982.pdf?s_searchtype=keyword)
- [24] STMICROELECTRONICS. *RM0090 Reference manual: STM32F405xx/07xx, ARM-based 32-bit MCUs*. Datasheet, Rev. 5. 2013, 1705 s. Dostupné z: [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference\\_manual/DM00031020.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf)
- [25] L6470 Stepper Driver Breakout. *Sparkfun* [online]. [cit. 2013-11-5]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/10859>
- [26] STMICROELECTRONICS. *L6470: Microstepping motor driver*. Datasheet, Rev. 5. 2012, 70 s. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00255075.pdf>
- [27] *LDO Motors: Hybrid stepper motor, LDO-57STH76-2804B*. Datasheet, 2011, 1 s. Dostupné z: <http://www.cctv-cnc.cz/soubor/lido-57sth76-2804b-reva-pdf/>
- [28] *LCD Module: INT070ATFT & INT070ATFT-TS*. Datasheet, Rev. 2.2, 2013, 15 s. Dostupné z: [https://www.displaytech-us.com/sites/default/files/display-data-sheet/int070atft-v22\\_0.pdf](https://www.displaytech-us.com/sites/default/files/display-data-sheet/int070atft-v22_0.pdf)
- [29] SOLOMON SYSTECH. *SSD1963: LCD Display controller*. Datasheet, Rev. 1.3, 2010, 94 s. Dostupné z: [https://www.displaytech-us.com/sites/default/files/driver-ic-data-sheet/SSD1963\\_1.3.pdf](https://www.displaytech-us.com/sites/default/files/driver-ic-data-sheet/SSD1963_1.3.pdf)
- [30] MAXIM. *MAX11800 - MAX11803: Resistive Touch-Screen Controllers*. Datasheet, Rev. 3. 2010, 59 s. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX11800-MAX11803.pdf>
- [31] Napájecí zdroj průmyslový. *4ISP* [online]. [cit. 2013-11-10]. Dostupné z: <http://cnc.inshop.cz/24v/napajecizdrojprumyslový24v250w%5BSYS-24250%5D?ItemIdx=2>

- [32] Použití krokových motorů: Závislost momentu na napětí. [online]. [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://microcon.cz/>
- [33] STM32F4DISCOVERY. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2013-11-20]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF252419>
- [34] *CooCox: Vývojové prostředí pro ARM Cortex* [online]. [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <http://coocox.org/index.html>
- [35] MicroXplorer. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2014-01-6]. Dostupné z: [https://my.st.com/public/STe2ecomunities/mcu/Lists/cortex\\_mx\\_stm32/DispForm.aspx?ID=36348](https://my.st.com/public/STe2ecomunities/mcu/Lists/cortex_mx_stm32/DispForm.aspx?ID=36348)
- [36] STM32F4xx Clock Configuration: V1.1.0. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2014-02-07]. Dostupné z: [http://www.st.com/web/en/catalog/tools/FM147/CL1794/SC961/SS1533/PF257927?s\\_searchtype=keyword#](http://www.st.com/web/en/catalog/tools/FM147/CL1794/SC961/SS1533/PF257927?s_searchtype=keyword#)
- [37] SPIN Family Evaluation Tool: V1.0. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/catalog/tools/PF258265#>
- [38] *Doxygen: Generátor dokumentace ze zdrojového kódu* [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>
- [39] *Graphviz: Grafická vizualizace zdrojového kódu* [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.graphviz.org/About.php>
- [40] Začínáme s STM32F4 Discovery. *MCU.cz* [online]. [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://mcu.cz/comment-n2848.html>
- [41] Vzorový projekt USB HID: usb\_hid\_3.zip. *Uloz.to* [online]. [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://ulozto.cz/xRiNQJu/usb-hid-3-zip>
- [42] Simple HID Write: VYUKA MPOA. *VUT Brno FEKT: Disk L* [online]. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: [https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/M\\_EST/MPOA/sw/](https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/M_EST/MPOA/sw/)
- [43] MANN, Burkhard a Václav LOSÍK. *C pro mikrokontroléry*. 1. české vydání. BEN, 2012, 280 s. ISBN 80-7300-077-6.



# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$R$	Odpor [ $\Omega$ ]
$L$	Indukčnost [H]
$C$	Kapacita [F]
$\tau$	Časová konstanta [s]
$t$	Čas [s]
$I$	Proud [A]
$i$	Proud závislý na čase [A]
$U$	Napětí [V]
$u$	Napětí závislé na čase [V]
AC	Alternating Current, Střídavý proud
AHB	Advanced High-performance Bus, Rozšířená vysokorychlostní sběrnice
APB	Advanced Peripheral Bus, Rozšířená sběrnice pro periferie
ARM	Advanced RISC Machine (původně Acorn RISC Machine), Architektura procesorů vyvinutá v Británii firmou ARM Limited
BEMF	Back Electro-Motive Force, Zpětná elektromotorická síla
BUSY	Busy, Signál určující zaneprázdnění obvodu
CAD	Computer Aided Design, Počítačem podporované projektování
CAM	Computer Aided Manufacturing, Počítačem podporované obrábění
CAN	Controller Area Network, Sériová datová sběrnice
CDC	Communication Device, Třída USB – virtuální COM port
CMOS	Complementary Metal – Oxide – Semiconductor, Komplementární polovodiče (kov – oxid – polovodič)
CNC	Computer Numeric Control, Číslíkové řízení počítačem
CPU	Central Processing Unit, Procesor (mikroprocesor)
CRC	Cyclic Redundancy Check, Cyklický redundantní součet
DC	Direct Current, Stejnosměrný proud
D/C	Data / Commands, Data / příkazy (podle úrovně napětí na lince)
DMA	Direct Memory Access, Přímý přístup do paměti
DPS	Deska Plošných Spojů

DSP	Digital Signal Processor, Digitální signálový procesor
E	Enable, Aktivační příkaz pro čtení sběrnic
FET	Field Effect Transistor, Polem řízený tranzistor
FPU	Floating Point Unit, Jednotka pro práci s čísly s pohyblivou řádovou čárkou
FSMC	Flexible Static Memory Controller, Periferie mikrokontroléru pro komunikaci s LCD
GND	Nulová svorka – zem
HID	Human Interface Device, Třída USB - Komunikace s uživatelem
I2C	Inter Integrated Circuit, Multi-masterová sériová sběrnice
I2S	Integrated Interchip Sound (Inter IC Sound), Digitální sériová sběrnice pro audio aplikace
LCD	Liquid Crystal Display, Displej z tekutých krystalů
LED	Light Emitting Diode, Luminiscenční dioda
MISO	SPI - Master Input, Slave Output, Vstup dat pro master
MMC	Multi Media Card, Paměťová karta s technologií paměti flash
MOSI	SPI - Master Output, Slave Input, Výstup dat pro master
MPU	Memory Protection Unit, Jednotka pro ochranu paměti
MSD	Mass Storage Device, Třída USB – Velkokapacitní úložiště
NC	Numeric Control, Číslicové řízení
OTG	On The Go (On To Go), Třída USB - Komunikace point to point
PC	Personal Computer, Osobní počítač
PWM	Pulse Width Modulation, Pulzně šířková modulace
RAM	Random Access Memory, Paměť s přímým přístupem
RD	Read, Čtení ze sběrnice
ROM	Read Only Memory, Paměť pouze pro čtení
RTOS	Real-Time Operating System, Operační systém reálného času
R/W	Read / Write, Čtení / zápis (podle úrovně napětí na lince)
SCLK	SPI - Serial Clock, Hodinový signál pro sériovou komunikaci
SDIO	Secure Digital Input Output, Rozhraní pro digitální paměťovou kartu
SPI	Serial Peripheral Interface, Sériové periferní rozhraní
SS	SPI - Slave Select (CS – Chip Select), Výběr slave zařízení
STCK	Step Clock, Vstup pro taktovací signál při krokování motoru
SWD	Serial Wire Debug, Sériové rozhraní pro programování a ladění ARM
TFT	Thin Film Transistor, Tenkofilmový tranzistorový displej

TTL	Transistor – Transistro Logic, Tranzistorově tranzistorová logika
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Reciever / Transmitter, Synchronní / asynchronní sériové rozhraní
USB	Universal Serial Bus, Univerzální sériová sběrnice
USB FS	Universal Serial Bus Full Speed, USB 12 Mbit/s (USB 1.1)
USB HS	Universal Serial Bus High Speed, USB 480 Mbit/s (USB 2.0)
USB LS	Universal Serial Bus Low Speed, USB 1,5 Mbit/s (USB 1.1)
VCC	Napájecí napětí
VS	Napájecí napětí
WR	Write, Zápis na sběrnici

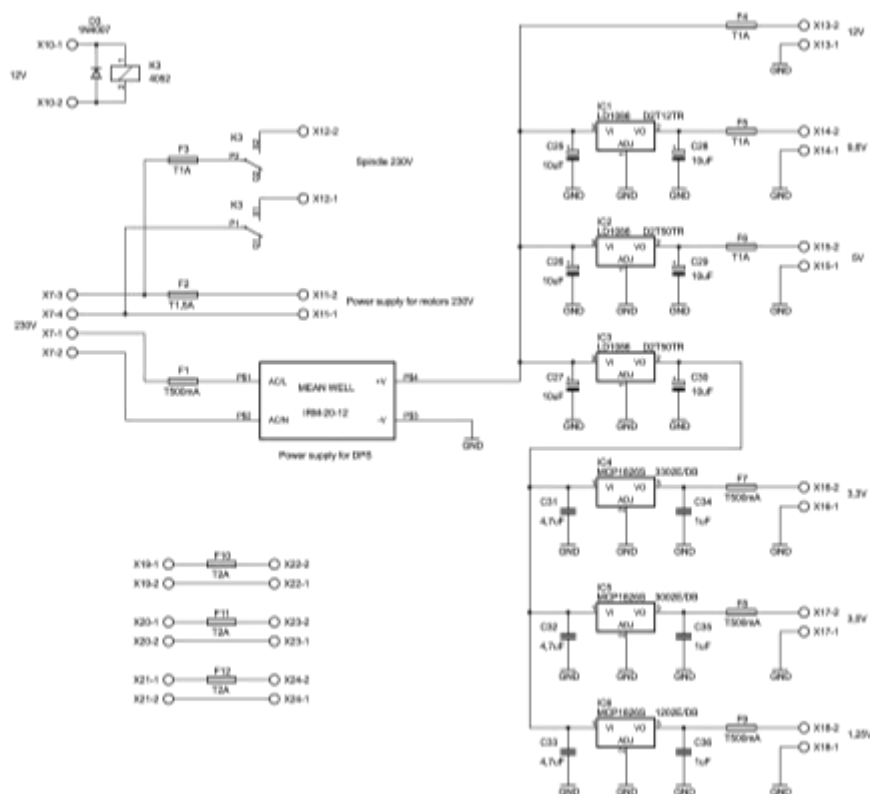
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Návrh zařízení</b>	<b>75</b>
A.1	Zdrojová část – Schéma zapojení .....	75
A.2	Zdrojová část – Deska plošného spoje.....	75
A.3	Zdrojová část – Osazovací plán (TOP).....	76
A.4	Zdrojová část – Osazovací plán (BOTTOM) .....	76
A.5	Rotační kodéry – Schéma zapojení.....	77
A.6	Rotační kodéry – Deska plošných spojů.....	77
A.7	Rotační kodéry – Osazovací plán (TOP) .....	78
A.8	Rotační kodéry – Osazovací plán (BOTTOM).....	78
A.9	Řídicí deska – Schéma zapojení .....	79
A.10	Řídicí deska – Deska plošných spojů (TOP) .....	80
A.11	Řídicí deska – Deska plošných spojů (BOTTOM).....	81
A.12	Řídicí deska – Osazovací plán (TOP).....	82
A.13	Řídicí deska – Osazovací plán (BOTTOM) .....	83
<b>B</b>	<b>Seznam součástek</b>	<b>84</b>
B.1	Součástky umístěné na DPS .....	84
B.2	Součástky umístěné v panelech .....	87
<b>C</b>	<b>Schémata zapojení modulů</b>	<b>88</b>
C.1	Schéma zapojení modulu STM L6470 .....	88
C.2	Schéma zapojení modulu STM32F4 DISCOVERY.....	89
<b>D</b>	<b>Části kódu pro procesor</b>	<b>95</b>
D.1	Knihovna L6470.c .....	95
D.2	Knihovna MAX11802.c.....	97
D.3	Knihovna SSD1963.c.....	98
<b>E</b>	<b>Konstrukční výkresy</b>	<b>100</b>
E.1	Přední stěna krabice ovládání .....	100
E.2	Zadní stěna krabice ovládání .....	100
E.3	Vrchní stěna krabice ovládání.....	101

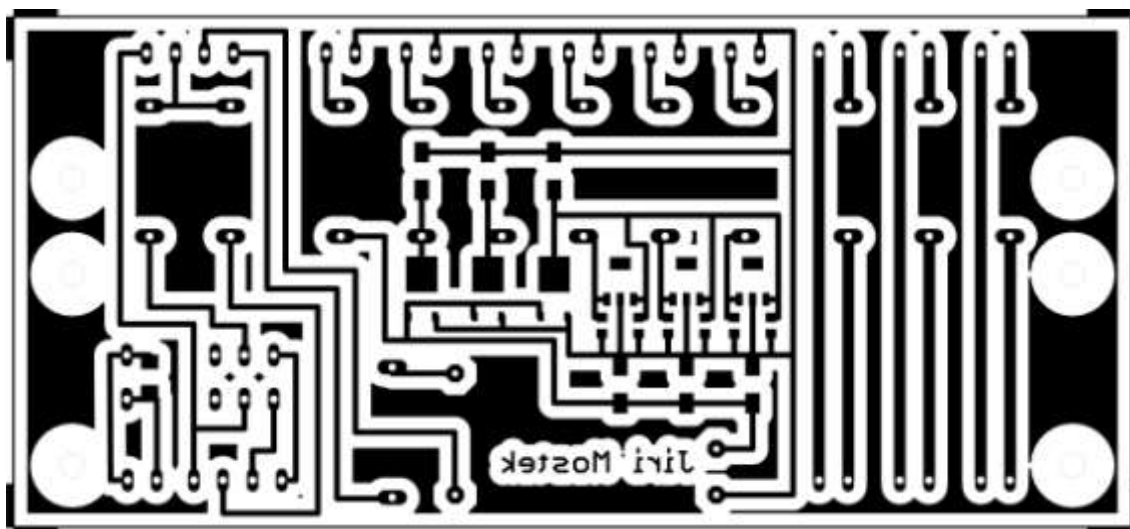
E.4	Spodní stěna krabice ovládání .....	102
E.5	Boční stěny krabice ovládání.....	103
<b>F</b>	<b>3D model stroje</b>	<b>104</b>
<b>G</b>	<b>Testovací desky</b>	<b>105</b>
G.1	Zkušební desky .....	105
G.2	Souřadnice pro kalibrační desku.....	105
G.3	Kalibrační deska .....	107
<b>H</b>	<b>Fotodokumentace</b>	<b>108</b>

# A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

## A.1 Zdrojová část – Schéma zapojení

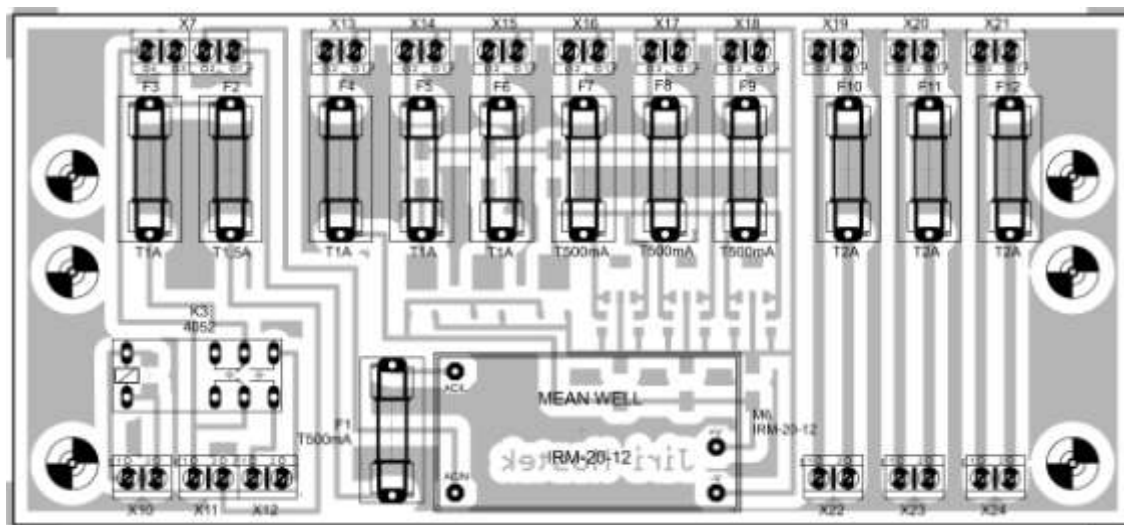


## A.2 Zdrojová část – Deska plošného spoje

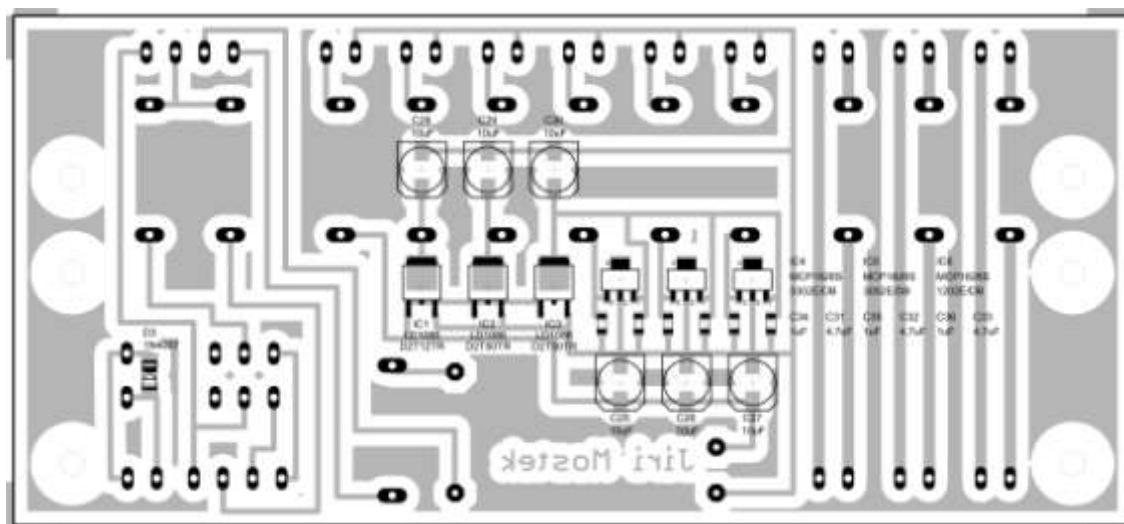


Rozměr desky 193 x 88 [mm], měřítko M1:1,3.

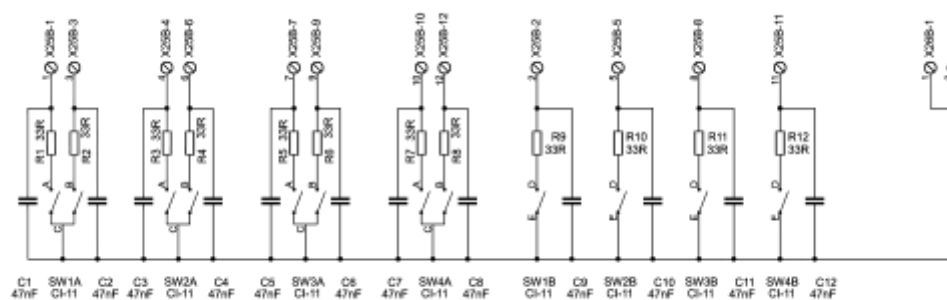
### A.3 Zdrojová část – Osazovací plán (TOP)



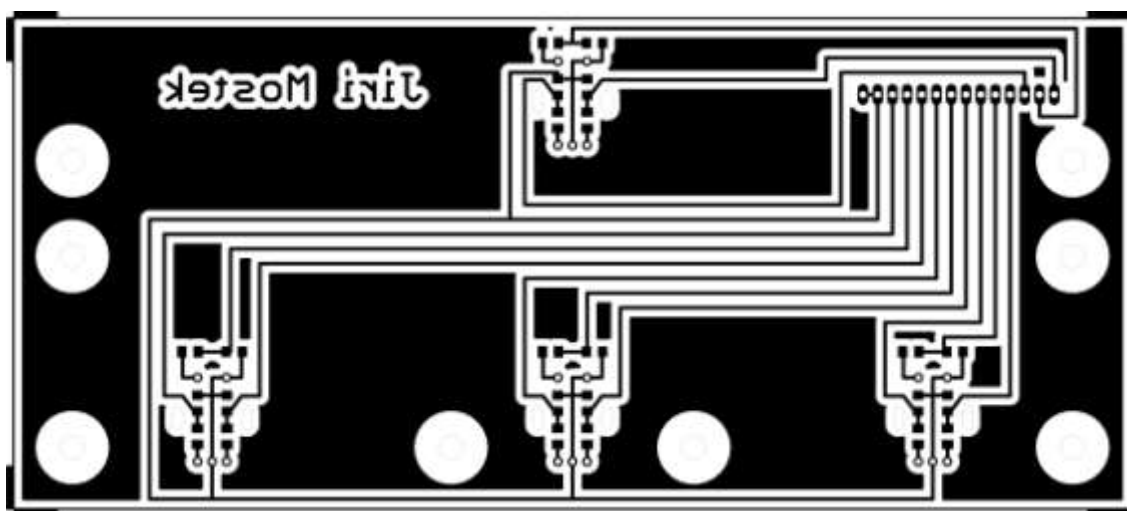
### A.4 Zdrojová část – Osazovací plán (BOTTOM)



## A.5 Rotační kodéry – Schéma zapojení



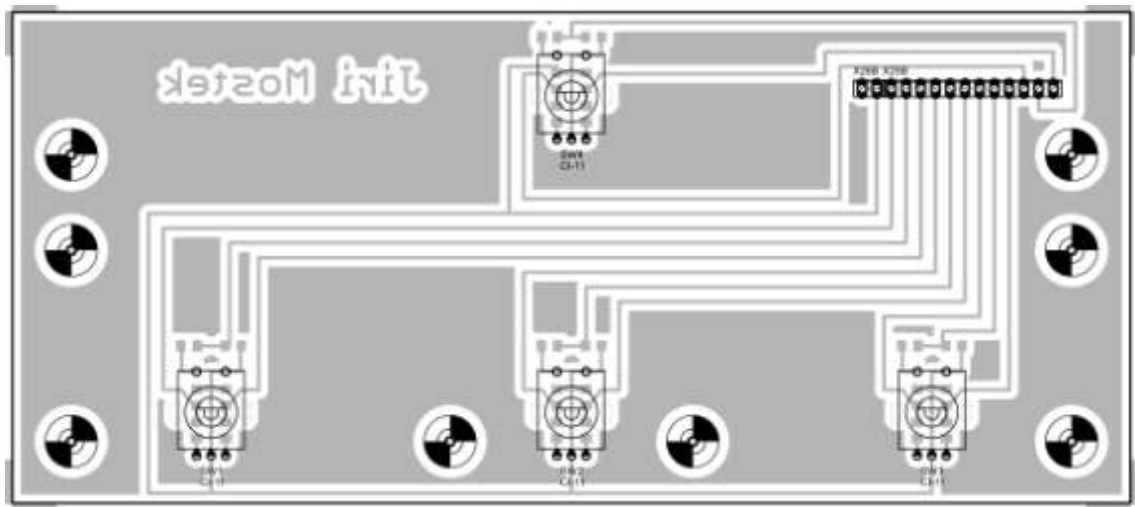
## A.6 Rotační kodéry – Deska plošných spojů



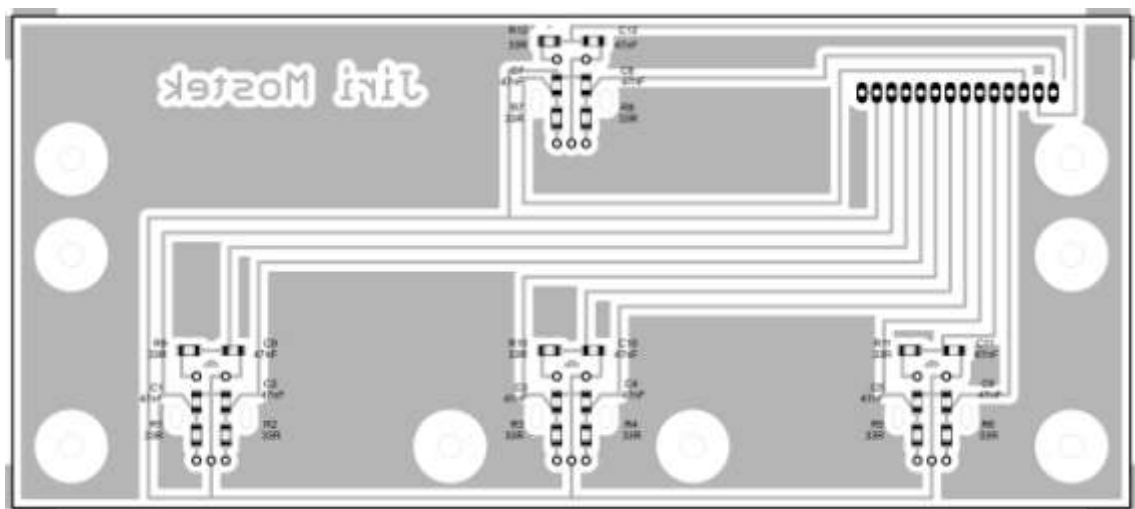
Rozměr desky 193 x 85 [mm], měřítko M1:1,3.



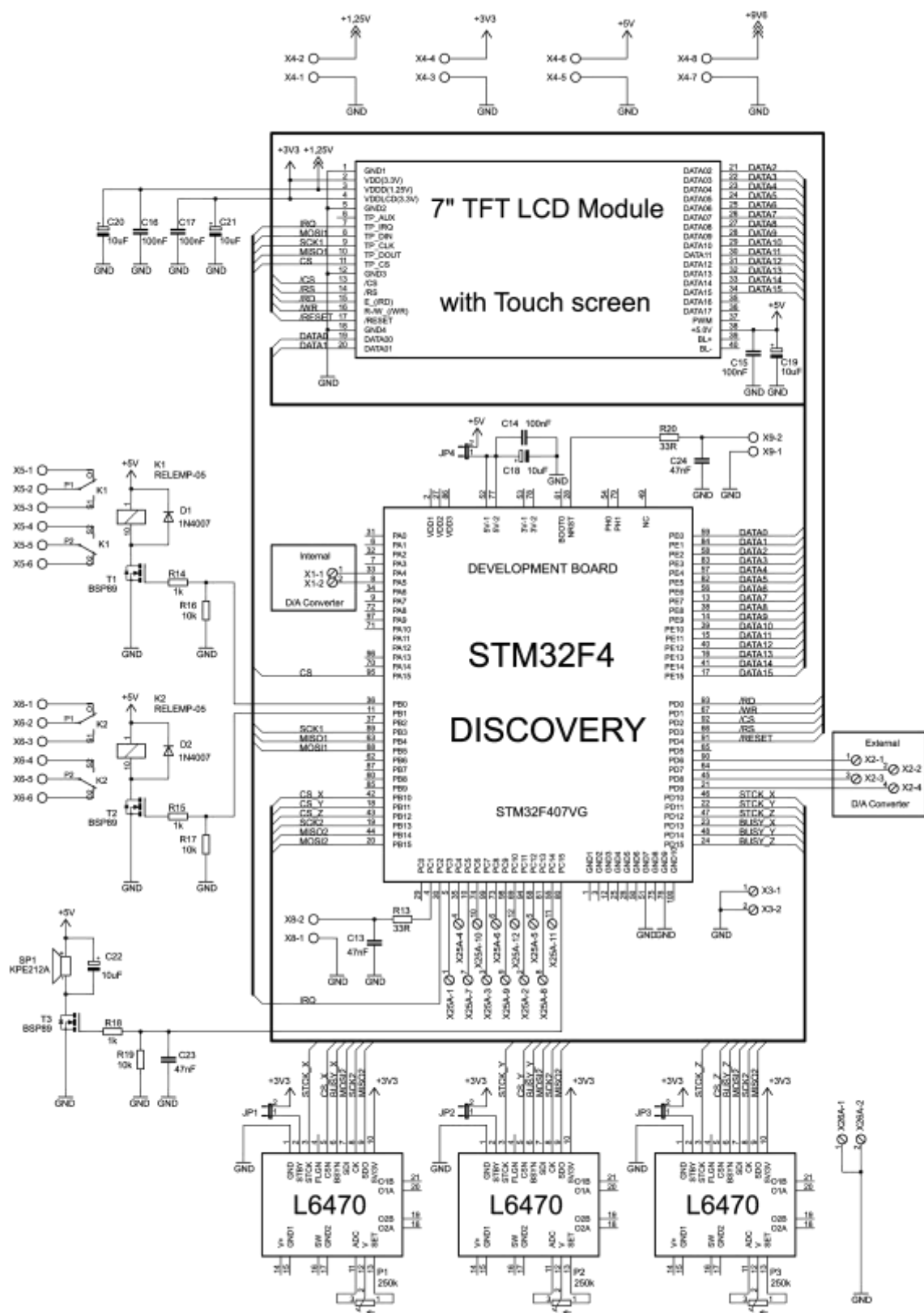
## A.7 Rotační kodéry – Osazovací plán (TOP)



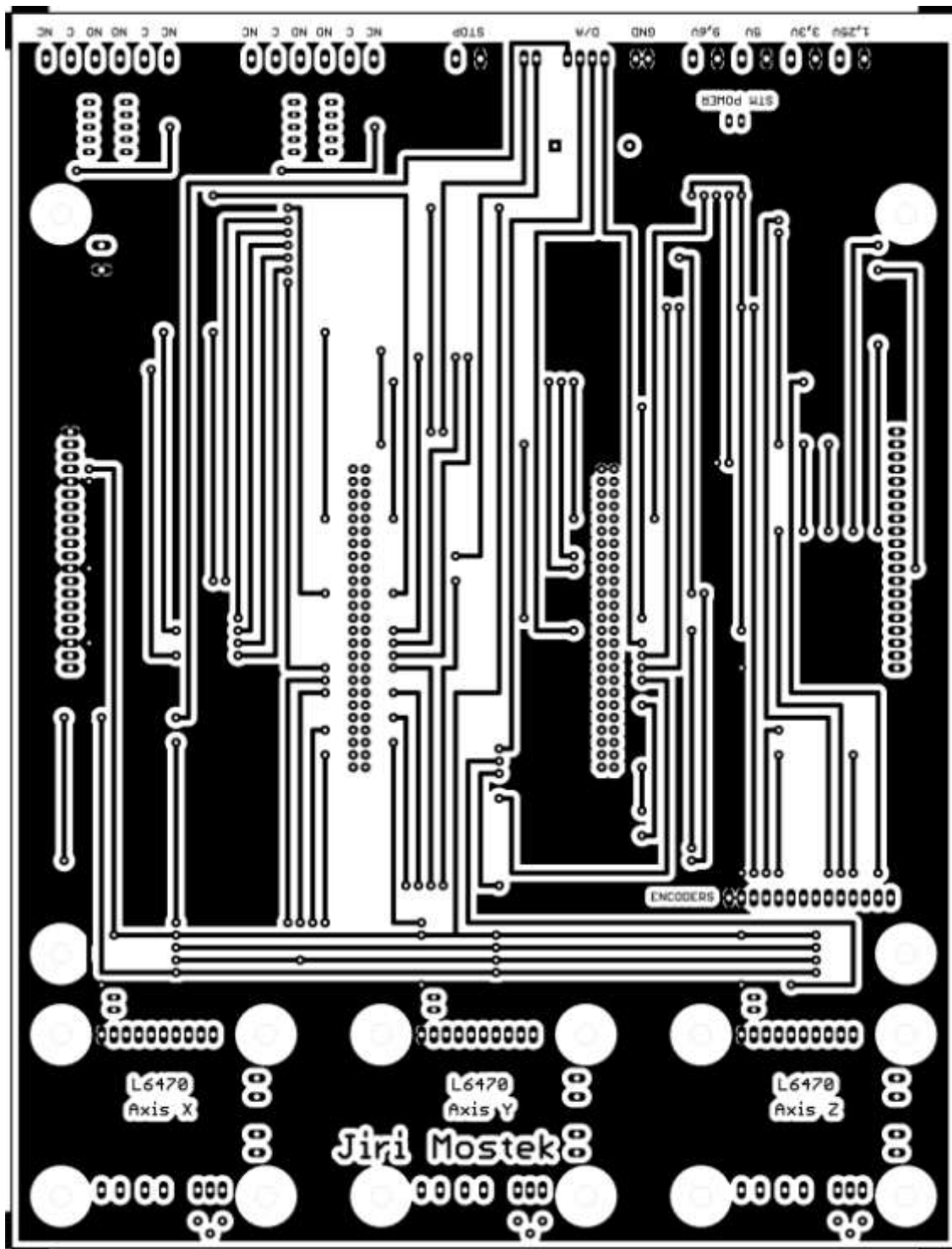
## A.8 Rotační kodéry – Osazovací plán (BOTTOM)



## A.9 Řídicí deska – Schéma zapojení

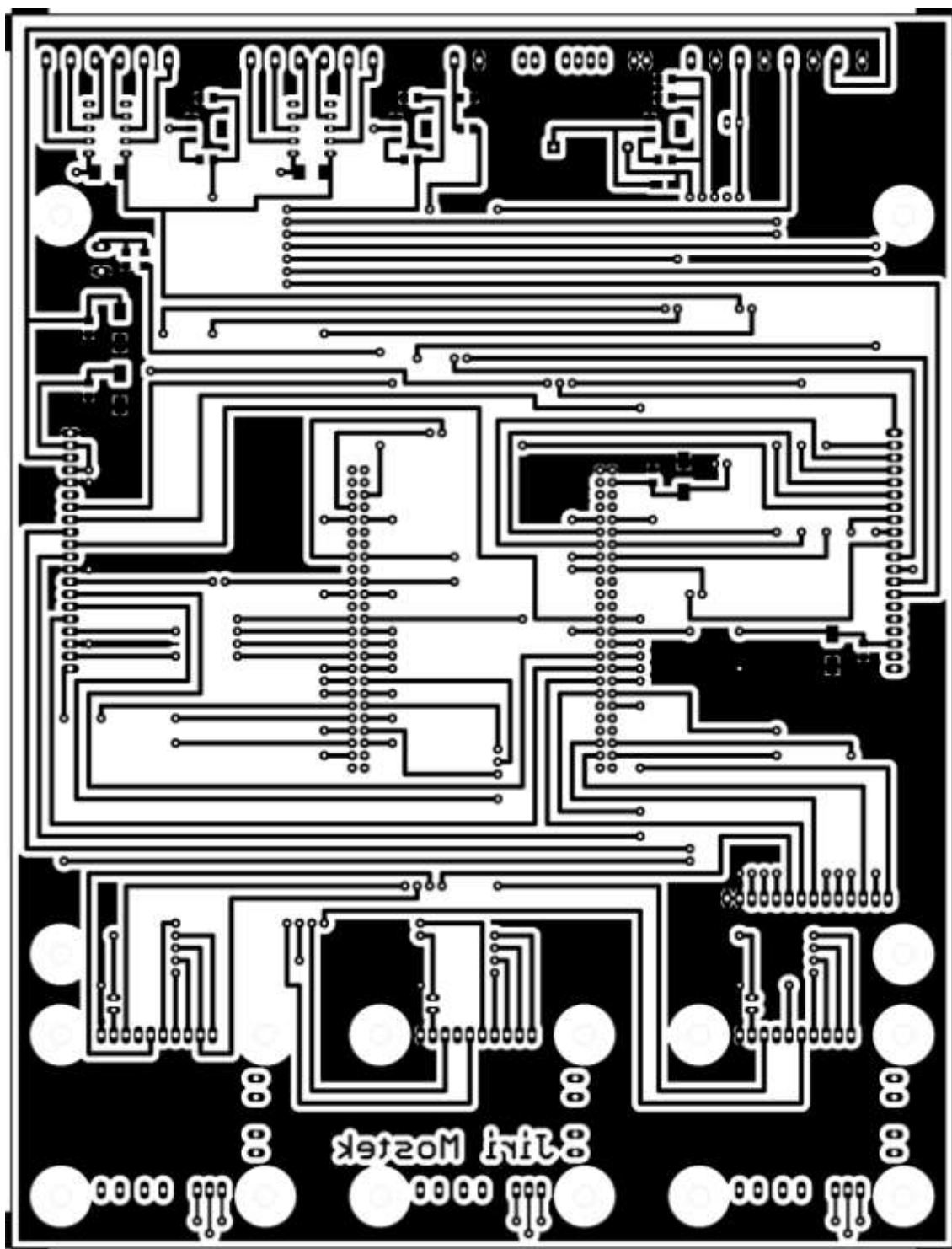


## A.10 Řídicí deska – Deska plošných spojů (TOP)



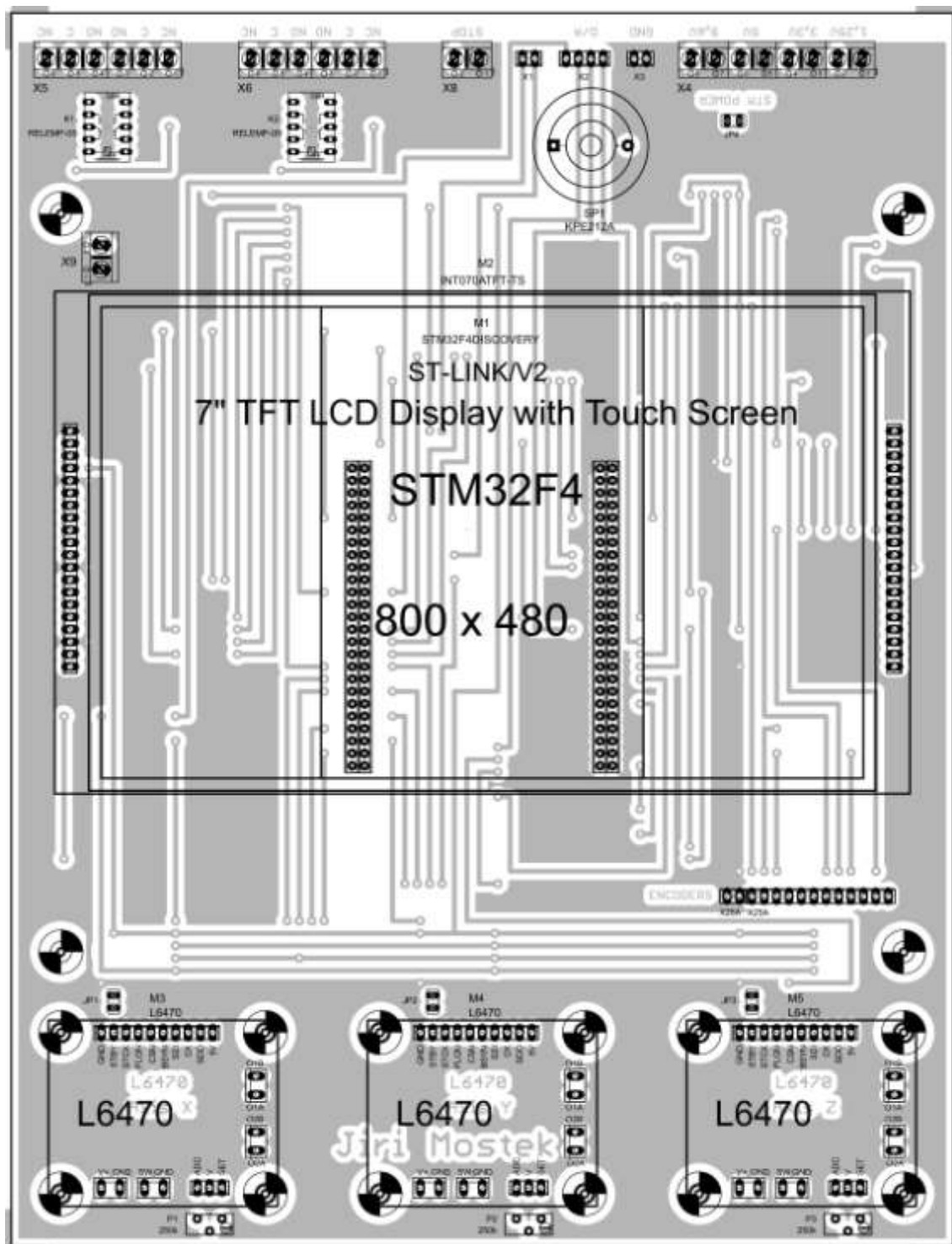
Rozměr desky 193 x 253 [mm], měřítko M1:1,3.

### A.11 Řídicí deska – Deska plošných spojů (BOTTOM)

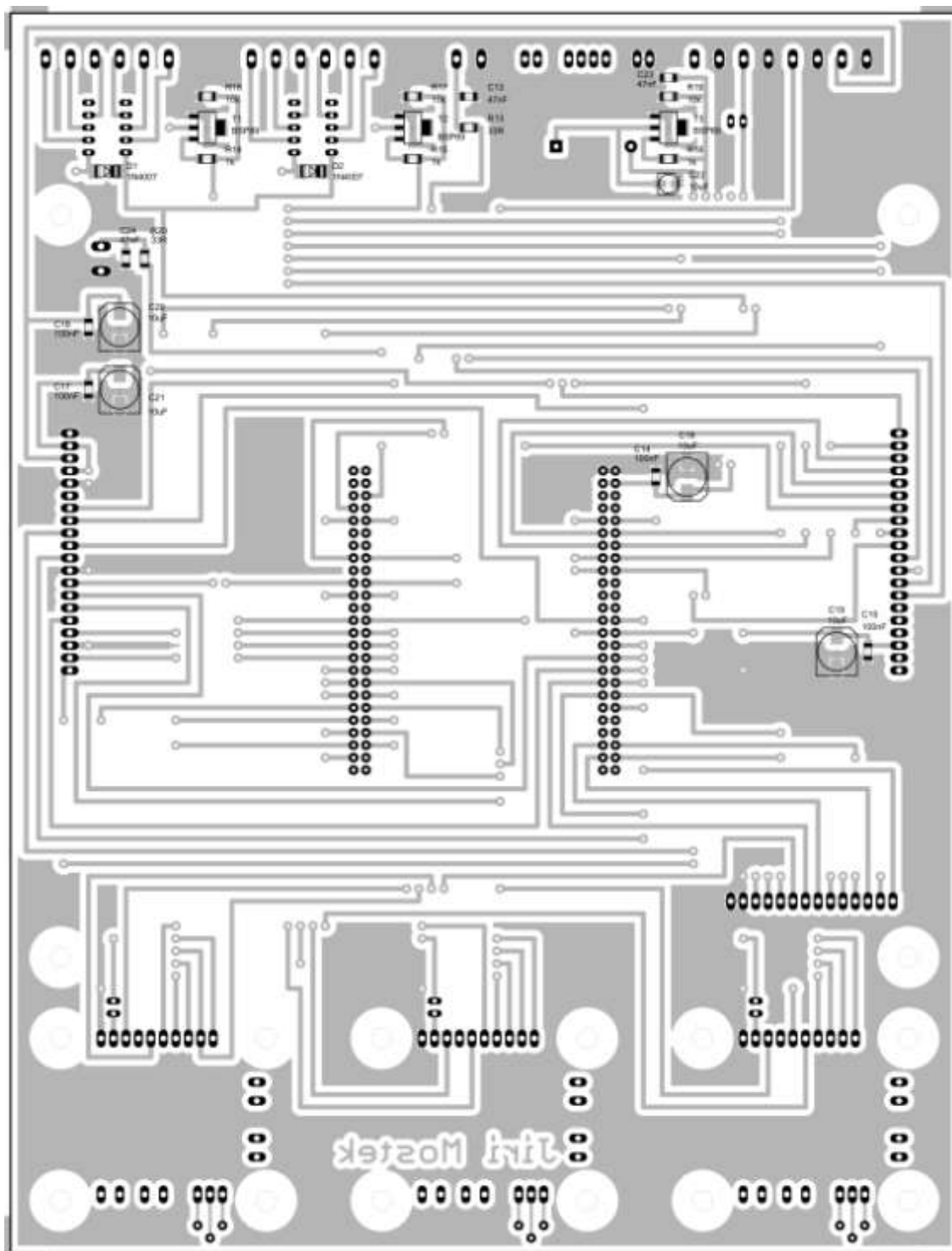


Rozměr desky 193 x 253 [mm], měřítko M1:1,3.

## A.12 Řídicí deska – Osazovací plán (TOP)



## A.13 Řídicí deska – Osazovací plán (BOTTOM)



## B SEZNAM SOUČÁSTEK

### B.1 Součástky umístěné na DPS

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	33R	M1206	SMD rezistor
R2	33R	M1206	SMD rezistor
R3	33R	M1206	SMD rezistor
R4	33R	M1206	SMD rezistor
R5	33R	M1206	SMD rezistor
R6	33R	M1206	SMD rezistor
R7	33R	M1206	SMD rezistor
R8	33R	M1206	SMD rezistor
R9	33R	M1206	SMD rezistor
R10	33R	M1206	SMD rezistor
R11	33R	M1206	SMD rezistor
R12	33R	M1206	SMD rezistor
R13	33R	M1206	SMD rezistor
R14	1k	M1206	SMD rezistor
R15	1k	M1206	SMD rezistor
R16	10k	M1206	SMD rezistor
R17	10k	M1206	SMD rezistor
R18	1k	M1206	SMD rezistor
R19	10k	M1206	SMD rezistor
R20	33R	M1206	SMD rezistor
P1	250k	64Y	Trimr cermentový víceotáčkový
P2	250k	64Y	Trimr cermentový víceotáčkový
P3	250k	64Y	Trimr cermentový víceotáčkový
C1	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C2	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C3	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C4	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C5	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C6	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C7	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C8	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C9	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C10	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C11	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C12	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C13	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C14	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C15	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C16	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C17	100nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C18	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C19	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C20	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C21	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C22	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C23	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C24	47nF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C25	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C26	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C27	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C28	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C29	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C30	10uF	140CLH-0810	SMD elektrolytický kondenz.
C31	4,7uF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C32	4,7uF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C33	4,7uF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C34	1uF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C35	1uF	C1206	SMD keramický kondenzátor
C36	1uF	C1206	SMD keramický kondenzátor
D1	1N4007	MELF-MLL41	SMD usměřňovací dioda
D2	1N4007	MELF-MLL41	SMD usměřňovací dioda
D3	1N4007	MELF-MLL41	SMD usměřňovací dioda
T1	BSP89	SOT223	Unipolární tranzistor, N kanál
T2	BSP89	SOT223	Unipolární tranzistor, N kanál
T3	BSP89	SOT223	Unipolární tranzistor, N kanál
IC1	LD1086D2T12	DPACK	Lineární stabilizátor 12V, 1.5A
IC2	LD1086D2T50	DPACK	Lineární stabilizátor 5V, 1.5A
IC3	LD1086D2T50	DPACK	Lineární stabilizátor 5V, 1.5A
IC4	MCP1826S-3302	SOT223	Lineární stabilizátor 3.3V, 1A
IC5	MCP1826S-3002	SOT223	Lineární stabilizátor 3V, 1A
IC6	MCP1826S-1202	SOT223	Lineární stabilizátor 1.2V, 1A
SP1	KPE212A	KPE212A	Sírenka 3-20V, 83dB
K1	RELEMP-05	G6H2-100	DC relé 5V, 2 x přepínací
K2	RELEMP-05	G6H2-100	DC relé 5V, 2 x přepínací
K3	RELEF4052-12	F4052	DC relé 12V, 2 x přepínací
F1	T 500mA	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F2	T 1,5A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm



Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
F3	T 1A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F4	T 1A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F5	T 1A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F6	T 1A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F7	T 500mA	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F8	T 500mA	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F9	T 500mA	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F10	T 2A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F11	T 2A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
F12	T 2A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20 mm
SW1	PEC11	CI-11	Inkrementální spínač
SW2	PEC11	CI-11	Inkrementální spínač
SW3	PEC11	CI-11	Inkrementální spínač
SW4	PEC11	CI-11	Inkrementální spínač
JP1 – JP4	JP	JP	Jumper 2 piny + propojka
X1	MPT2	MPT2	Kolíková lišta 2 piny
X2	MPT4	MPT4	Kolíková lišta 4 piny
X3	MPT2	MPT2	Kolíková lišta 2 piny
X4	AK500/8	AK500/8	Svorkovnice do DPS, 8 pinů
X5 – X6	AK500/6	AK500/6	Svorkovnice do DPS, 6 pinů
X7	AK500/4	AK500/4	Svorkovnice do DPS, 4 piny
X8 – X24	AK500/2	AK500/2	Svorkovnice do DPS, 2 piny
X25A	MPT12	MPT12	Dutinková lišta, 12 pinů
X25B	MPT12	MPT12	Kolíková lišta, 12 pinů
X26A	MPT2	MPT2	Dutinková lišta, 2 piny
X26B	MPT2	MPT2	Kolíková lišta, 2 piny
M1	Discovery F4	Discovery F4	Vývojový kit STM
M2	INT070ATFT-TS	INT070ATFT-TS	7“ dotykový LCD displej
M3	Modul L6470	Modul L6470	Modul s obvodem L6470
M4	Modul L6470	Modul L6470	Modul s obvodem L6470
M5	Modul L6470	Modul L6470	Modul s obvodem L6470
M6	IRM-20-12	IRM-20-12	Napájecí zdroj 21W, 12V

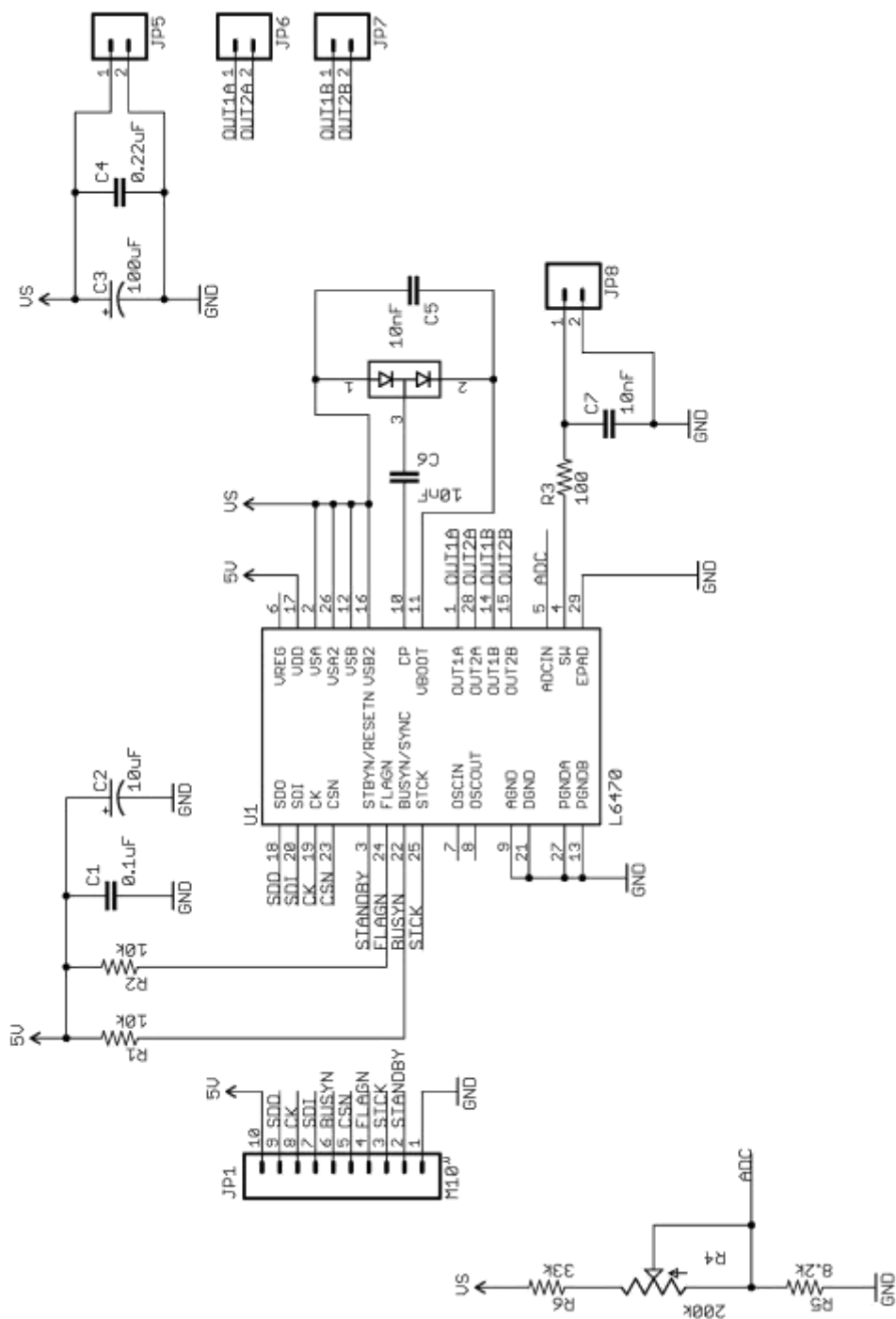
## B.2 Součástky umístěné v panelech

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
SW1	P-H8650VB01		Kolébkový spínač
SW2	P-H8650VB01		Kolébkový spínač
SW3	P-H8660VB		Kolébkový přepínač
TL1			Tlačítko černé
TL2			Tlačítko červené
K1-K3	MIC324 + MIC334		Konektor 4 piny
K4-K5	MIC328 + MIC338		Konektor 8 pinů
K6			Konektor 2 x USB
K7	SHURTER 6100.3200		Síťový EURO konektor
K8	SHURTER 6600.3200		Síťový EURO konektor

## C SCHÉMATA ZAPOJENÍ MODULŮ

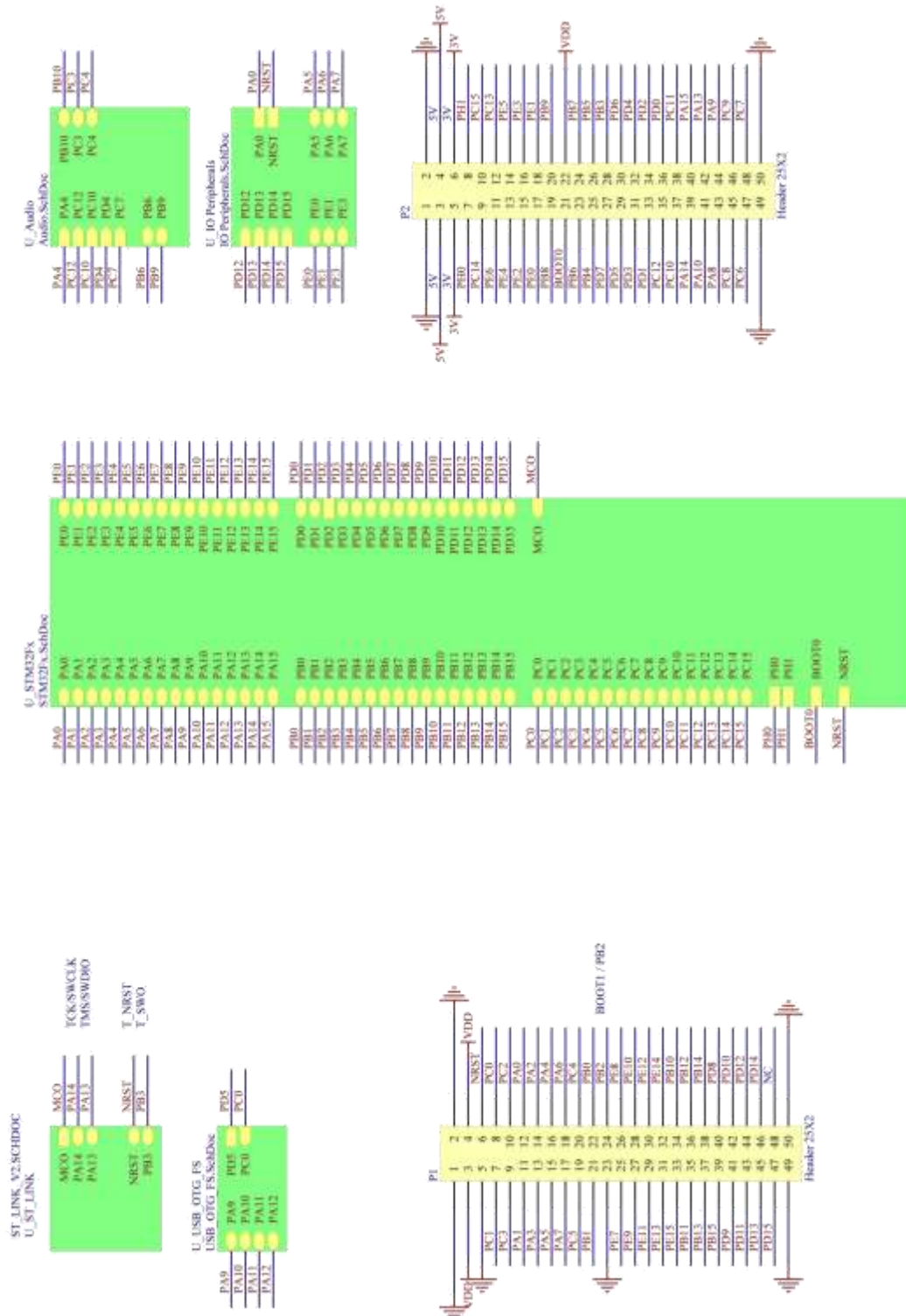
### C.1 Schéma zapojení modulu STM L6470

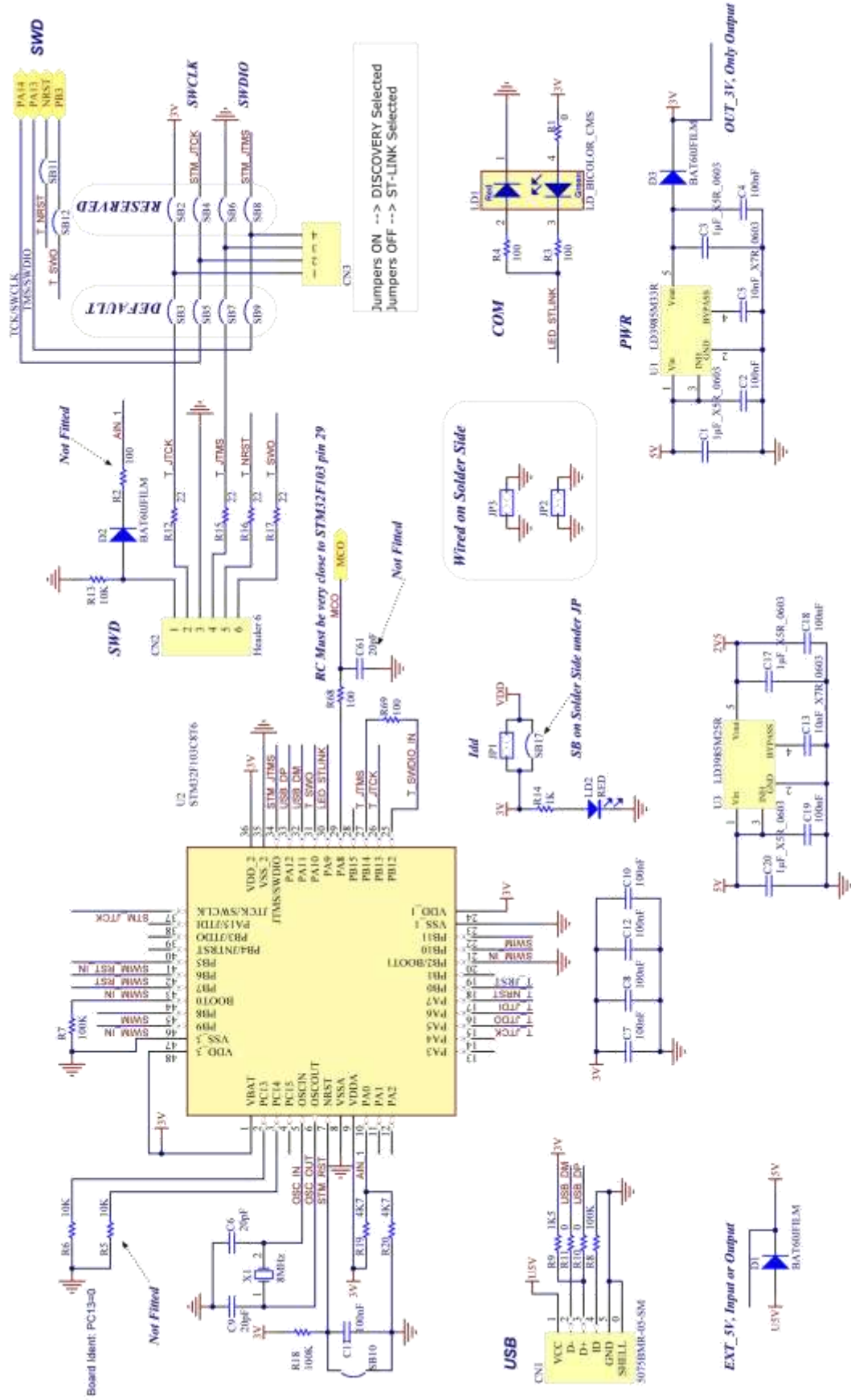
Schéma modulu bylo převzato z [25].

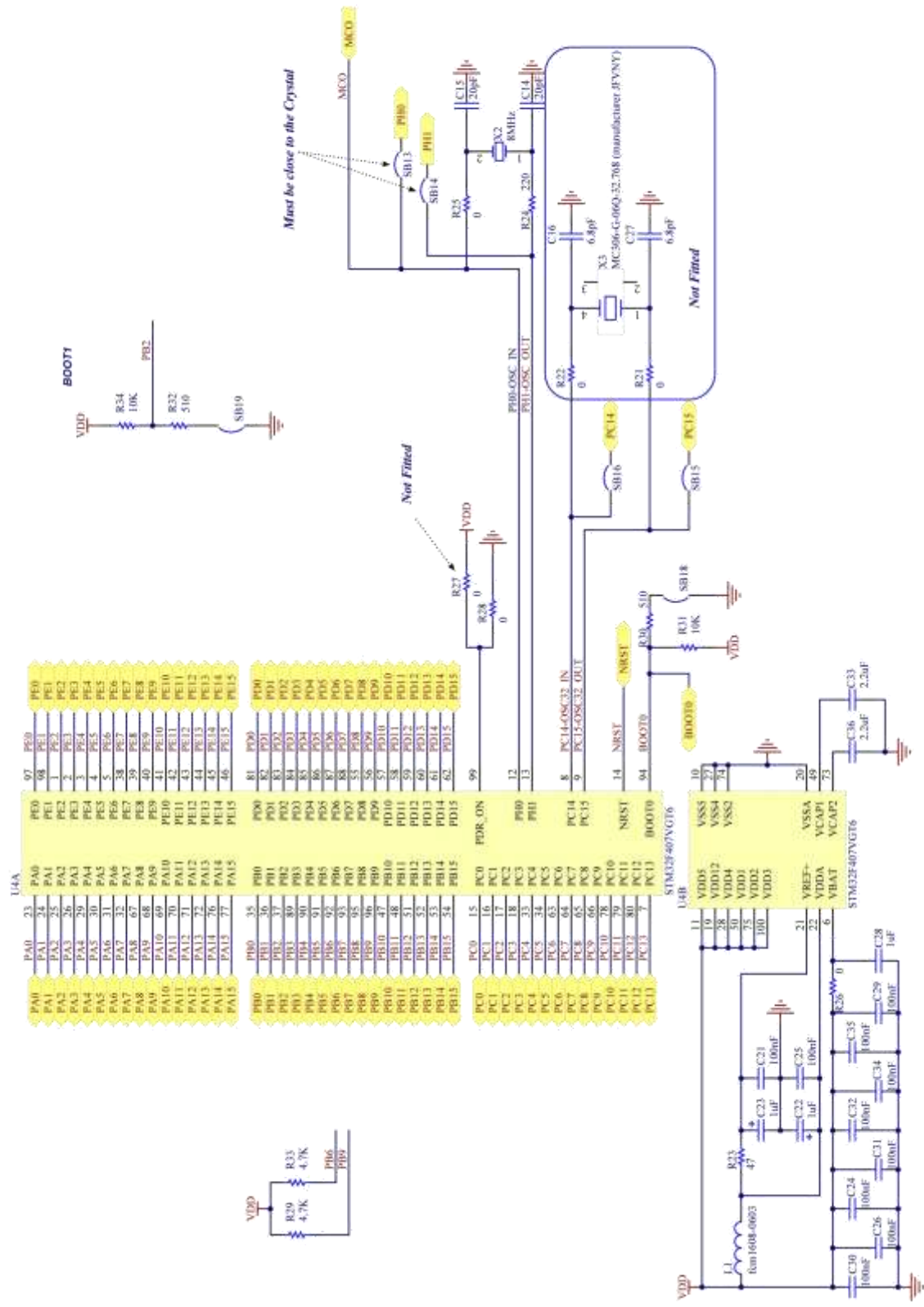


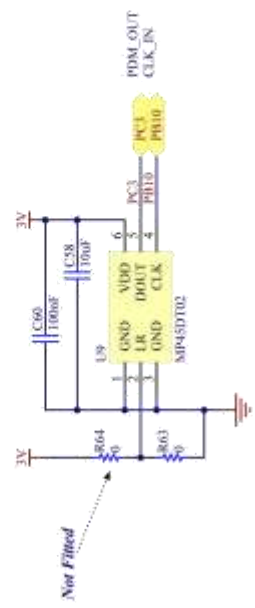
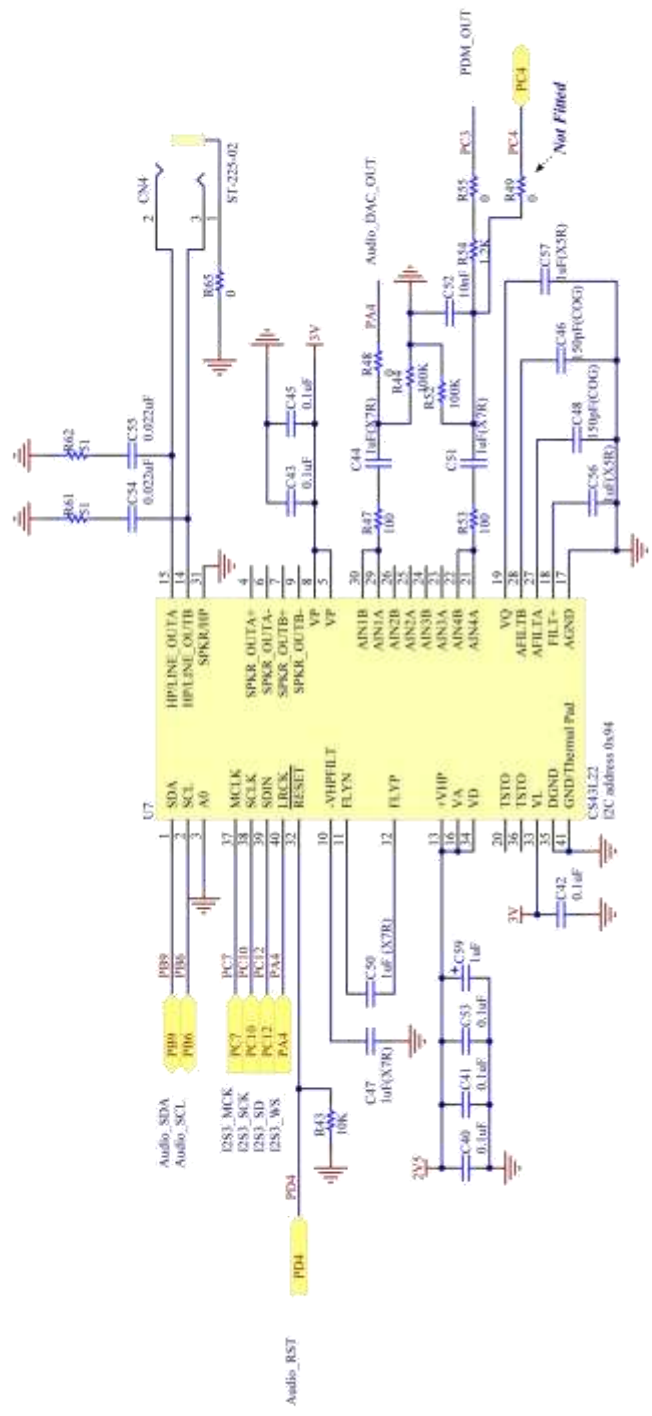
## C.2 Schéma zapojení modulu STM32F4 DISCOVERY

Schémata modulu byly převzaty z [33].



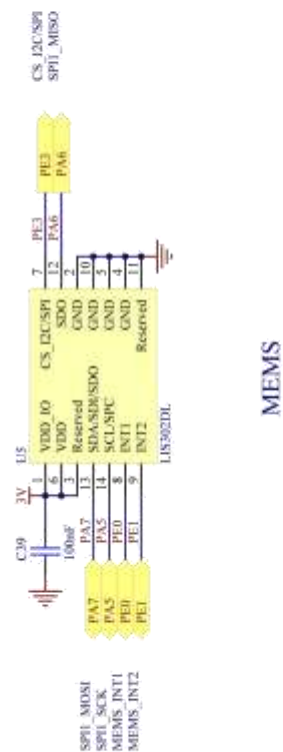
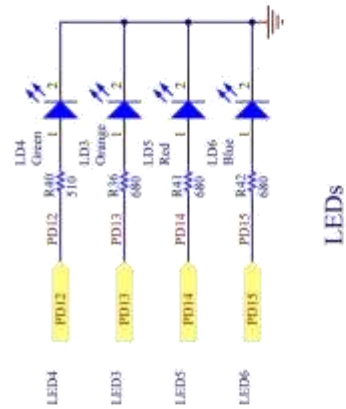
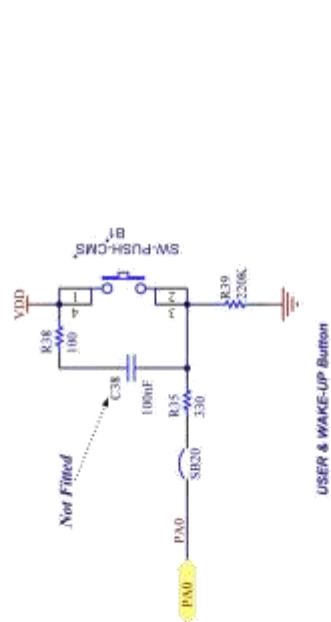
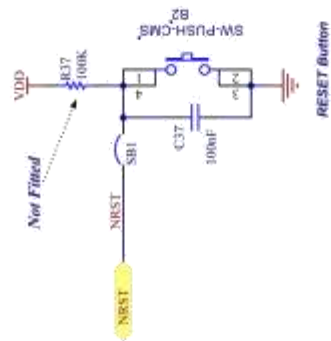












# D ČÁSTI KÓDU PRO PROCESOR

## D.1 Knihovna L6470.c

Konfigurace SPI rozhraní pro komunikaci s motorovými drivey:

```
void L6470_SPI_Config (void)                                     //SPI for all axis
{
    GPIO_InitTypeDef      GPIO_InitStructure;
    SPI_InitTypeDef       SPI_InitStructure;

    /* Enable GPIO clocks */
    RCC_AHB1PeriphClockCmd (RCC_AHB1Periph_GPIOB, ENABLE);
    RCC_AHB1PeriphClockCmd (RCC_AHB1Periph_GPIOD, ENABLE);

    /* Enable SPI clocks */
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_SPI2, ENABLE);

    /*GPIO Init - Outputs for CS*/
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = L6470_NSS_X_PIN | L6470_NSS_Y_PIN | L6470_NSS_Z_PIN;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_OUT;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_25MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP;
    GPIO_Init(L6470_NSS_PORT, &GPIO_InitStructure);

    /*GPIO Init - Inputs for BUSY*/
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = L6470_BUSY_X_PIN | L6470_BUSY_Y_PIN | L6470_BUSY_Z_PIN;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_25MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
    GPIO_Init(L6470_BUSY_PORT, &GPIO_InitStructure);

    /* Set alternative functions */
    GPIO_PinAFConfig (L6470_SCK_PORT, L6470_SCK_PINSOURCE, GPIO_AF_SPI2);           //SPI2-SCK
    GPIO_PinAFConfig (L6470_MISO_PORT, L6470_MISO_PINSOURCE, GPIO_AF_SPI2);         //SPI2-MISO
    GPIO_PinAFConfig (L6470_MOSI_PORT, L6470_MOSI_PINSOURCE, GPIO_AF_SPI2);        //SPI2-MOSI

    /* GPIO Init - SCK, MISO, MOSI*/
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_25MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;

    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = L6470_SCK_PIN | L6470_MISO_PIN | L6470_MOSI_PIN ;
    GPIO_Init(L6470_PORT, &GPIO_InitStructure);

    SPI_I2S_DeInit (SPI2);

    /* Initialize SPI communication */
    SPI_InitStructure.SPI_BaudRatePrescaler = SPI_BaudRatePrescaler_8;
    SPI_InitStructure.SPI_CPHA = SPI_CPHA_2Edge;                               //Clock Phase Second
    SPI_InitStructure.SPI_CPOL = SPI_CPOL_High;                               //Clock Polarity High
    SPI_InitStructure.SPI_CRCPolynomial = 7;                                   //Control Redund. Check
    SPI_InitStructure.SPI_DataSize = SPI_DataSize_8b;
    SPI_InitStructure.SPI_Direction = SPI_Direction_2Lines_FullDuplex;
    SPI_InitStructure.SPI_FirstBit = SPI_FirstBit_MSB;
    SPI_InitStructure.SPI_Mode = SPI_Mode_Master;
    SPI_InitStructure.SPI_NSS = SPI_NSS_Soft;                                  //Slave Select Management

    SPI_Init (SPI2, &SPI_InitStructure);

    SPI_Cmd (SPI2, ENABLE);
}
```

## Inicializace obvodu L6470 – nastavení parametrů pro řízení motorů:

```
void L6470_Init (void)
{
    axis_t axis_xyz;
    for (axis_xyz = 0; axis_xyz<=2; axis_xyz++)
    {
        L6470_SetParam(axis_xyz, ACC, NO_PRESETS, 0x44, VALUE_NULL); //989 step/s2
        L6470_SetParam(axis_xyz, DEC, NO_PRESETS, 0x44, VALUE_NULL); //989 step/s2
        L6470_SetParam(axis_xyz, MAX_SPEED, NO_PRESETS, 0x41, VALUE_NULL); //991 step/s
        L6470_SetParam(axis_xyz, MIN_SPEED, LSPD_OPT_OFF, 0x00, VALUE_NULL) //0 step/s
        L6470_SetParam(axis_xyz, FS_SPD, NO_PRESETS, 0x0D, VALUE_NULL); //206 step/s
        L6470_SetParam(axis_xyz, KVAL_HOLD, NO_PRESETS, 0x4, VALUE_NULL); //1.6 % Vs
        L6470_SetParam(axis_xyz, KVAL_RUN, NO_PRESETS, 0x19, VALUE_NULL); //9.8 % Vs
        L6470_SetParam(axis_xyz, KVAL_ACC, NO_PRESETS, 0x19, VALUE_NULL); //9.8 % Vs
        L6470_SetParam(axis_xyz, KVAL_DEC, NO_PRESETS, 0x19, VALUE_NULL); //9.8 % Vs
        L6470_SetParam(axis_xyz, INT_SPEED, NO_PRESETS, 0xA33, VALUE_NULL); //155 step/s
        L6470_SetParam(axis_xyz, ST_SLP, NO_PRESETS, 0x18, VALUE_NULL); //0.036 % s/step
        L6470_SetParam(axis_xyz, FN_SLP_ACC, NO_PRESETS, 0x41, VALUE_NULL); //0.097 % s/step
        L6470_SetParam(axis_xyz, FN_SLP_DEC, NO_PRESETS, 0x41, VALUE_NULL); //0.097 % s/step
        L6470_SetParam(axis_xyz, OCD_TH, NO_PRESETS, 0x05, VALUE_NULL); //2.250 A
        L6470_SetParam(axis_xyz, STALL_TH, NO_PRESETS, 0x39, VALUE_NULL); //1.812 A
        L6470_SetParam(axis_xyz, STEP_MODE, NO_PRESETS, 0x00, VALUE_NULL); //Full step mode
        L6470_SetParam(axis_xyz, STEP_MODE, SYNC_EN_BUSY | STEP_SEL_FULL_STEP, VALUE_NULL,
        VALUE_NULL);
        //L6470_SetParam(axis_xyz, CONFIG, NO_PRESETS, VALUE_NULL, VALUE_NULL);
    }
}
```

## D.2 Knihovna MAX11802.c

Konfigurace SPI rozhraní pro komunikaci s obvodem pro dotykovou vrstvu:

```
void MAX11802_SPI_Config (void)                                     //SPI for Touch Screen
{
    GPIO_InitTypeDef          GPIO_InitStructure;
    SPI_InitTypeDef           SPI_InitStructure;

    /* Enable SPI clocks */
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_SPI1, ENABLE);

    /* Enable GPIO clocks */
    RCC_AHB1PeriphClockCmd (RCC_AHB1Periph_GPIOA, ENABLE);
    RCC_AHB1PeriphClockCmd (RCC_AHB1Periph_GPIOB, ENABLE);

    /* Set alternative functions */
    GPIO_PinAFConfig (MAX11802_SCK_PORT, MAX11802_SCK_PINSOURCE, GPIO_AF_SPI1); //SPI1-SCK
    GPIO_PinAFConfig (MAX11802_MISO_PORT, MAX11802_MISO_PINSOURCE, GPIO_AF_SPI1); //SPI1-MISO
    GPIO_PinAFConfig (MAX11802_MOSI_PORT, MAX11802_MOSI_PINSOURCE, GPIO_AF_SPI1); //SPI1-MOSI
    GPIO_PinAFConfig (MAX11802_NSS_PORT, MAX11802_NSS_PINSOURCE, GPIO_AF_SPI1); //SPI1-NSS

    /* GPIO Init - SCK, MISO, MOSI*/
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = MAX11802_SCK_PIN | MAX11802_MISO_PIN | MAX11802_MOSI_PIN;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_2MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;

    GPIO_Init(MAX11802_PORT, &GPIO_InitStructure);

    /* GPIO Init - CS*/
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = MAX11802_NSS_PIN;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_2MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP;

    GPIO_Init(MAX11802_NSS_PORT, &GPIO_InitStructure);

    SPI_I2S_DeInit (SPI1);

    /* Initialize SPI communication */
    SPI_InitStructure.SPI_BaudRatePrescaler = SPI_BaudRatePrescaler_8;
    SPI_InitStructure.SPI_CPHA = SPI_CPHA_1Edge; //Clock Phase First
    SPI_InitStructure.SPI_CPOL = SPI_CPOL_Low; //Clock Polarity Low
    SPI_InitStructure.SPI_CRCPolynomial = 7; //Control Redund. Check
    SPI_InitStructure.SPI_DataSize = SPI_DataSize_8b;
    SPI_InitStructure.SPI_Direction = SPI_Direction_2Lines_FullDuplex;
    SPI_InitStructure.SPI_FirstBit = SPI_FirstBit_MSB;
    SPI_InitStructure.SPI_Mode = SPI_Mode_Master;

    SPI_InitStructure.SPI_NSS = SPI_NSS_Soft; //Slave select management

    SPI_Init (SPI1, &SPI_InitStructure);
    SPI_Cmd (SPI1, ENABLE);
}
```

Inicializace obvodu MAX11802:

```
void MAX11802_Init (void)
{
    MAX11802_WriteCommand(adr_GEN_CONFIG, 0x63); //General Config. Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_MEAS_RES_CONFIG, 0x00); //Meas. Resolution Config. Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_MEAS_AVG_CONFIG, 0xF0); //Measurement Averag. Config. Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_ADC_SAMPLE_TIME_CONFIG, 0x50); //ADC Sample Time Config. Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_PANEL_SETUP_TIME_CONFIG, 0x20); //Panel Setup Times Config. Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_ADC_DELAY_INIT_CONV_CONFIG, 0x20); //ADC Config. Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_TOUCH_DETECT_PULLUP_TIMES_CONFIG, 0x77); //Touch-Detect Conf. Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_AUT_MODE_TIME_CONFIG, 0x00); //Aut. Mode Timing Config. Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_APERT_SET_CONFIG, 0x00); //Aperture Set. (Auto) Config. Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_AUX_MEAS_CONFIG, 0x00); //Auxiliary Meas. Config.Reg.
    MAX11802_WriteCommand(adr_OPERATE_MODE_CONFIG, 0x0C); //Operating Mode Config. Reg.
}
```

## D.3 Knihovna SSD1963.c

Konfigurace řídicího a datového portu pro obvod SSD1963:

```
void SSD1963_GPIO_Config (void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;

    /* Enable GPIO clocks */
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOD, ENABLE);
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOE, ENABLE);

    /* GPIO Init - Control*/
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin =  SSD1963_PIN_A0 | SSD1963_PIN_CS |SSD1963_PIN_RD |
                                    SSD1963_PIN_WR | SSD1963_PIN_RST;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
    GPIO_Init(SSD1963_CTRLPORT, &GPIO_InitStructure);

    /* GPIO Init - Data*/
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_All;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
    GPIO_Init(SSD1963_DATAPORT, &GPIO_InitStructure);

    while (GPIO_ReadInputDataBit(SSD1963_CTRLPORT, SSD1963_PIN_CS)==0);

    /* GPIO Init - Control*/
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin =  SSD1963_PIN_A0 | SSD1963_PIN_CS |SSD1963_PIN_RD |
                                    SSD1963_PIN_WR | SSD1963_PIN_RST;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_OUT;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP;
    GPIO_Init(SSD1963_CTRLPORT, &GPIO_InitStructure);

    /* GPIO Init - Data*/
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_All;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_OUT;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL;
    GPIO_Init(SSD1963_DATAPORT, &GPIO_InitStructure);
}
```

## Inicializace obvodu SSD1963:

```
void SSD1963_Init (void)
{
    SSD1963_GPIO_Config ();

    volatile unsigned int dly;

    GPIO_ResetBits(SSD1963_CTRLPORT, SSD1963_PIN_RST);
    for(dly = 0; dly < 1000; dly++);
    GPIO_SetBits(SSD1963_CTRLPORT, SSD1963_PIN_RST);
    for(dly = 0; dly < 1000; dly++);

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SOFT_RESET);           //Software Reset

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_PLL_MN);           //Set the Multiplier and Divider for PLL
    SSD1963_WriteData(49);                               // Multipl., PLLclk = REFclk * 50 (500MHz)
    SSD1963_WriteData(4);                               // Divider, SYSclock = PLLclk / 5 (100MHz)
    SSD1963_WriteData(4);                               // Effectuate

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_PLL);              //Start the PLL
    SSD1963_WriteData(0x01);                            //Enable PLL

    for(dly = 0; dly < 100000; dly++);

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_PLL);              //Start the PLL
    SSD1963_WriteData(0x03);                            //Enable PLL, Use PLL as system clock

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_LCD_MODE);         //Set LCD mode and resolution
    SSD1963_WriteData(0x0C);                             //Data width, FRC enable,...
    SSD1963_WriteData(0x00);                             //TFT type
    SSD1963_WriteData(mHIGH((TFT_WIDTH-1)));             //Horizontal panel size, MSB
    SSD1963_WriteData(mLOW((TFT_WIDTH-1)));              //Horizontal panel size, LSB
    SSD1963_WriteData(mHIGH((TFT_HEIGHT-1)));            //Vertical panel size, MSB
    SSD1963_WriteData(mLOW((TFT_HEIGHT-1)));             //Vertical panel size, LSB
    SSD1963_WriteData(0b000000);

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_PIXEL_DATA_INTERFACE); //Pixel data format
    SSD1963_WriteData(SSD1963_PDI_16BIT565);            //16 bit, 565 format

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_LSHIFT_FREQ);      //Pixel clock frequency
    SSD1963_WriteData((LCD_FPR >> 16) & 0xFF);          //The highest Byte
    SSD1963_WriteData((LCD_FPR >> 8) & 0xFF);            //Higher Byte
    SSD1963_WriteData(LCD_FPR & 0xFF);                   //Low Byte

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_HORI_PERIOD);      //Set front porch and black porch
    SSD1963_WriteData(mHIGH(TFT_HSYNC_PERIOD));
    SSD1963_WriteData(mLOW(TFT_HSYNC_PERIOD));
    SSD1963_WriteData(mHIGH((TFT_HSYNC_PULSE + TFT_HSYNC_BACK_PORCH)));
    SSD1963_WriteData(mLOW((TFT_HSYNC_PULSE + TFT_HSYNC_BACK_PORCH)));
    SSD1963_WriteData(TFT_HSYNC_PULSE);
    SSD1963_WriteData(0x00);
    SSD1963_WriteData(0x00);
    SSD1963_WriteData(0x00);

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_VERT_PERIOD);      //Set the vertical blanking interval
    SSD1963_WriteData(mHIGH(TFT_VSYNC_PERIOD));
    SSD1963_WriteData(mLOW(TFT_VSYNC_PERIOD));
    SSD1963_WriteData(mHIGH((TFT_VSYNC_PULSE + TFT_VSYNC_BACK_PORCH)));
    SSD1963_WriteData(mLOW((TFT_VSYNC_PULSE + TFT_VSYNC_BACK_PORCH)));
    SSD1963_WriteData(TFT_VSYNC_PULSE);
    SSD1963_WriteData(0x00);
    SSD1963_WriteData(0x00);

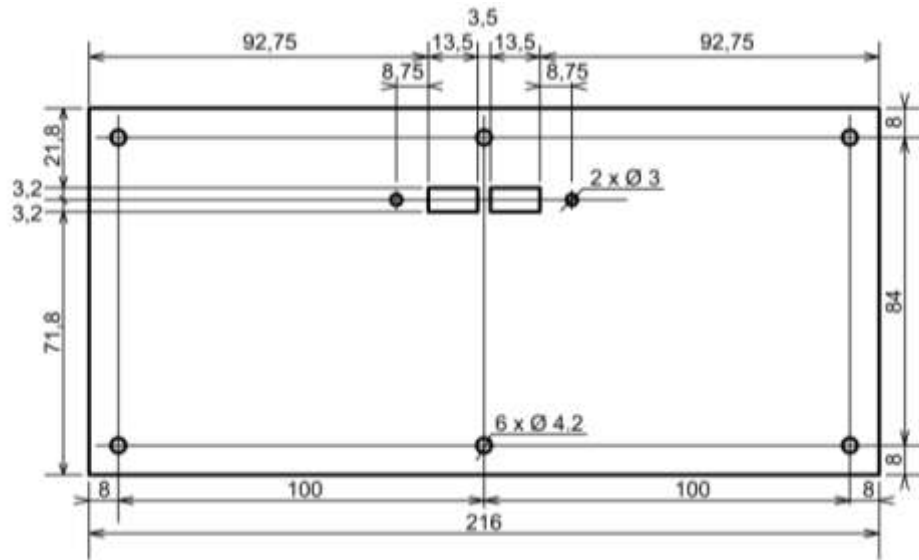
    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_PWM_CONF);         //Set the PWM for B/L
    SSD1963_WriteData(0x06);                             //PWM frequency
    SSD1963_WriteData(0x80);                             //PWM duty cycle
    SSD1963_WriteData(0x01);                             //Dynamain Backlight Config., PWM enable
    SSD1963_WriteData(0xf0);                             //DBC manual Brightness
    SSD1963_WriteData(0x00);                             //DBC minimum brightness
    SSD1963_WriteData(0x00);                             //Brightness prescaler

    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_ADDRESS_MODE);    //Rotation picture
    SSD1963_WriteData(0x02);

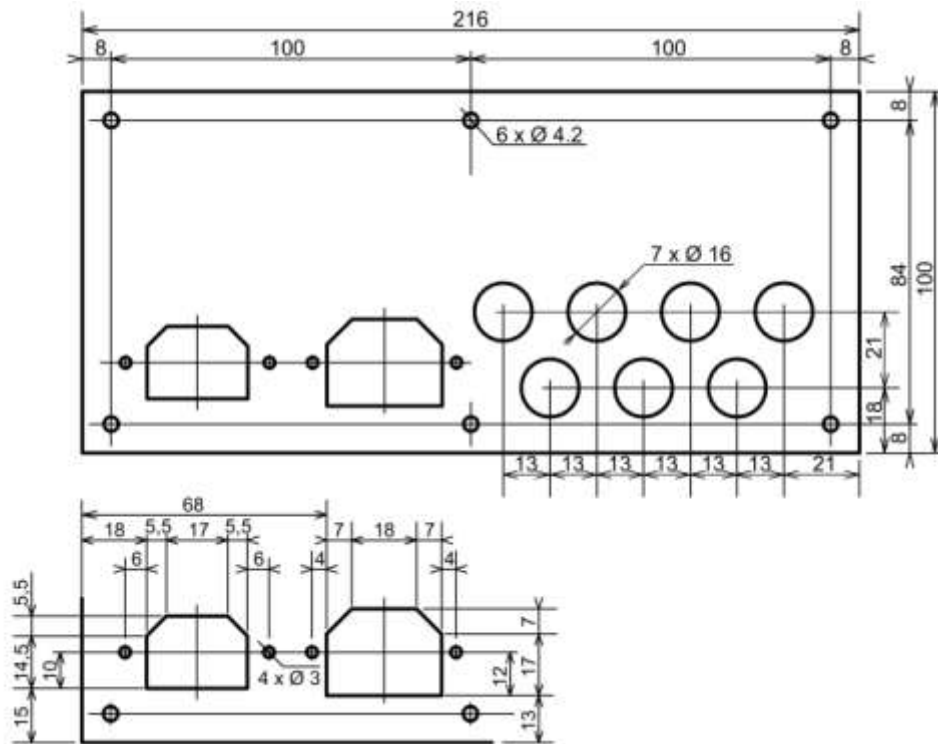
    SSD1963_WriteCommand(SSD1963_SET_DISPLAY_ON);      //SET display on
}
```

## E KONSTRUKČNÍ VÝKRESY

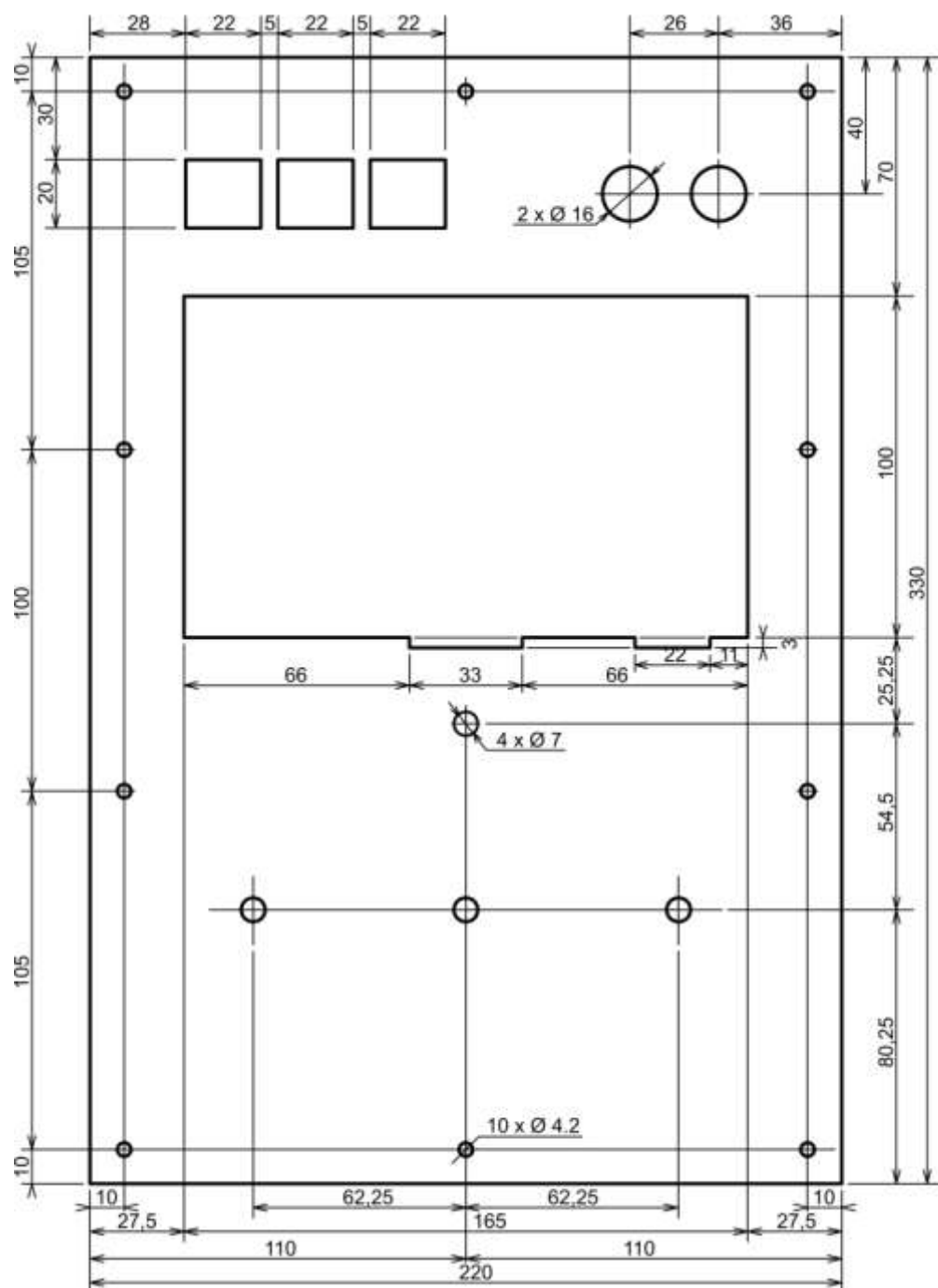
## E.1 Přední stěna krabice ovládání



## E.2 Zadní stěna krabice ovládání

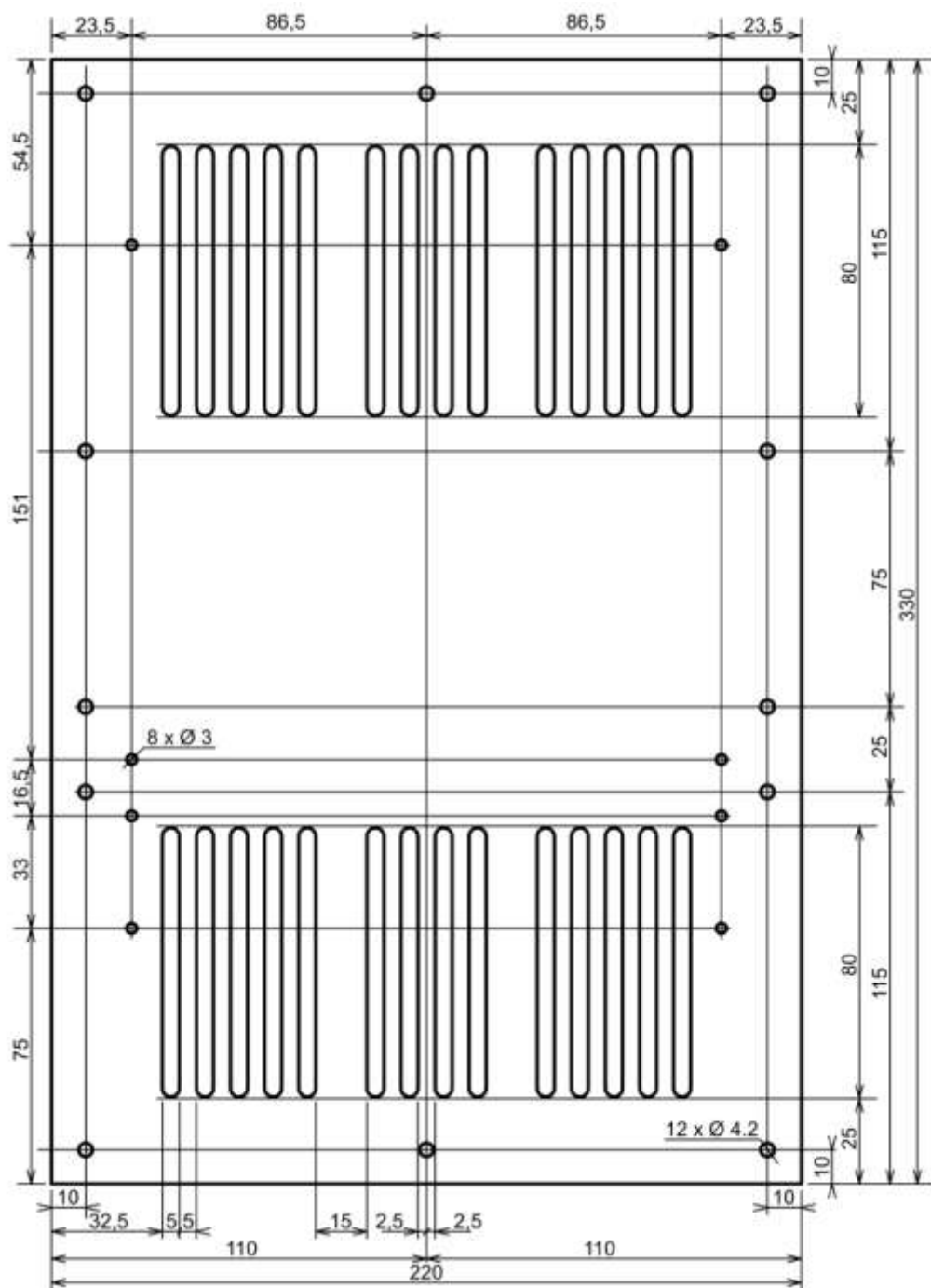


### E.3 Vrchní stěna krabice ovládání

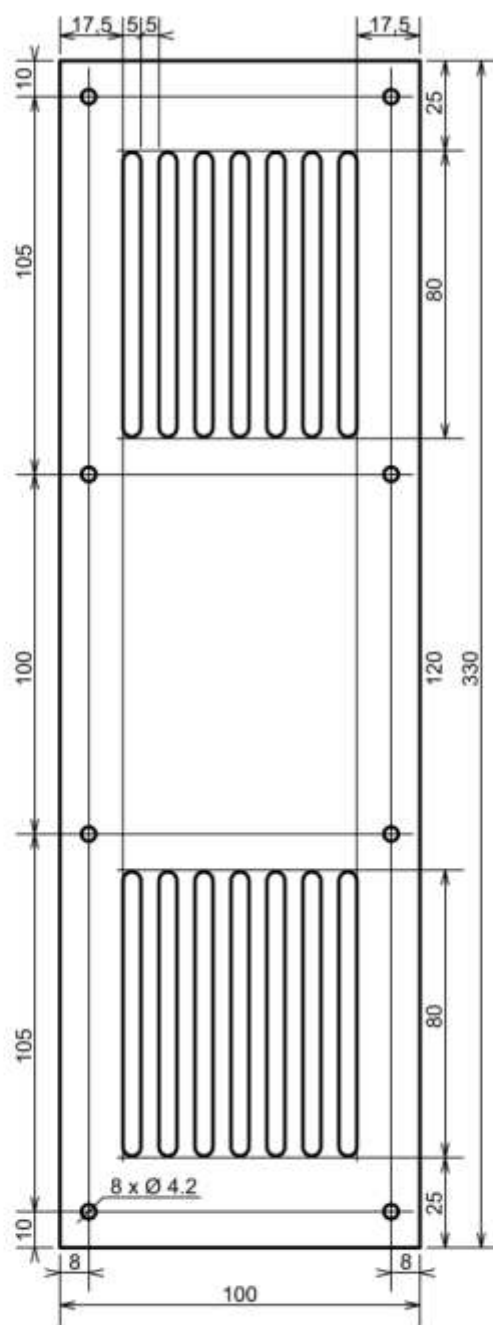




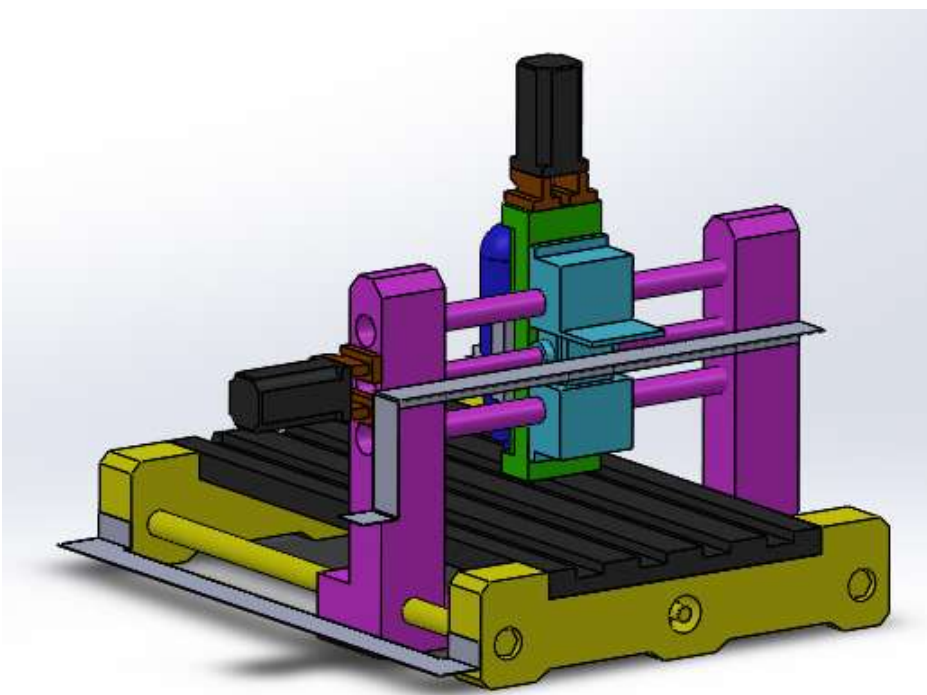
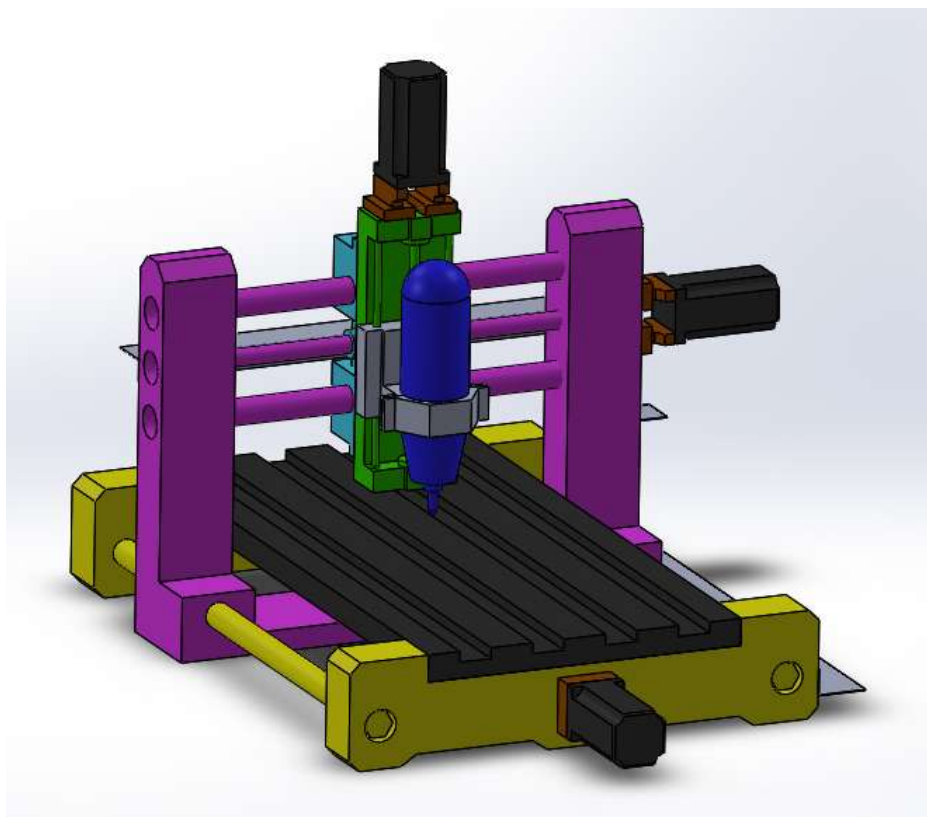
## E.4 Spodní stěna krabice ovládání



## E.5 Boční stěny krabice ovládání

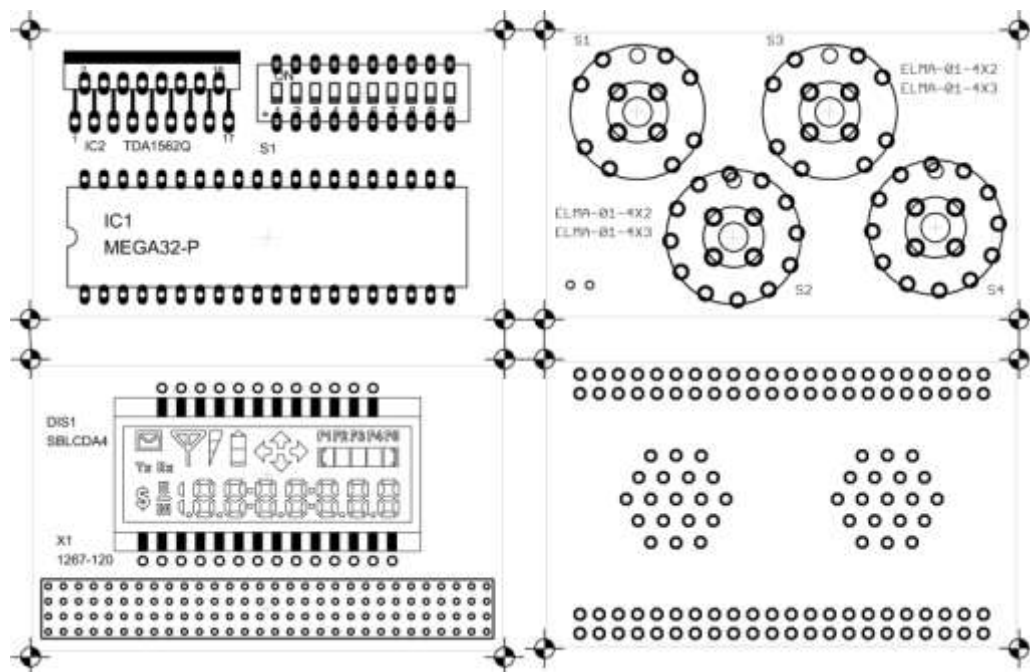


## F 3D MODEL STROJE



## G TESTOVACÍ DESKY

### G.1 Zkušební desky



### G.2 Souřadnice pro kalibrační desku

```

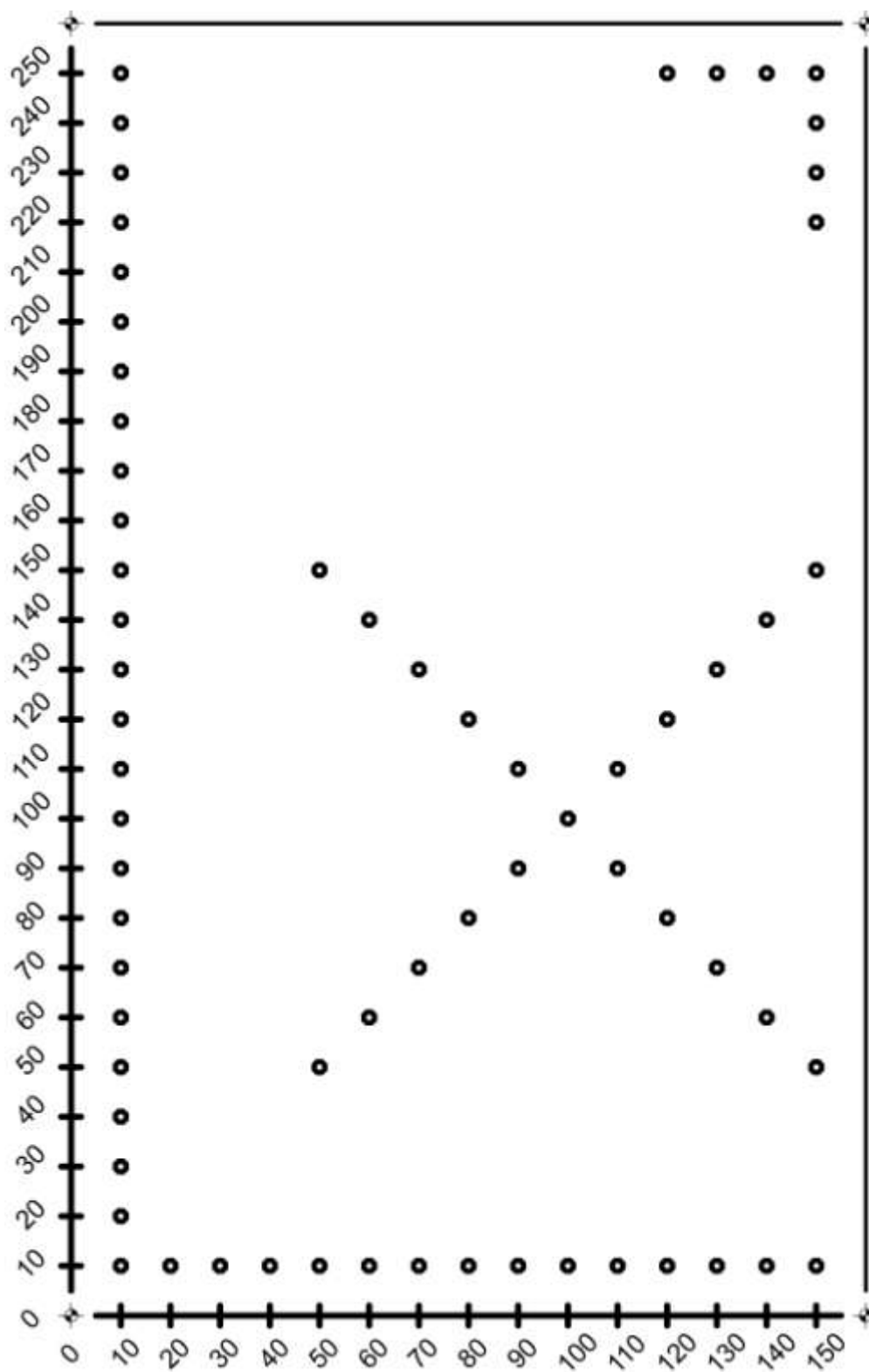
WR 00  EE 01 EE 00 01 10

WR 00  EE 01 FF FF FF FF FF FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 00 10 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 00 20 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 00 30 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 00 40 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 00 50 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 00 60 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 00 70 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 00 80 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 00 90 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 00 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 10 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 20 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 30 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 40 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 50 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 60 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 70 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 80 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 01 90 00 FF
WR 00  AA 00 10 00 BB 02 00 00 FF

```

WR	00	AA	00	10	00	BB	02	10	00	FF
WR	00	AA	00	10	00	BB	02	20	00	FF
WR	00	AA	00	10	00	BB	02	30	00	FF
WR	00	AA	00	10	00	BB	02	40	00	FF
WR	00	AA	00	10	00	BB	02	50	00	FF
WR	00	AA	00	10	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	00	20	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	00	30	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	00	40	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	00	50	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	00	60	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	00	70	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	00	80	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	00	90	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	01	00	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	01	10	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	01	20	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	01	30	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	01	40	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	01	50	00	BB	00	10	00	FF
WR	00	AA	00	50	00	BB	00	50	00	FF
WR	00	AA	00	60	00	BB	00	60	00	FF
WR	00	AA	00	70	00	BB	00	70	00	FF
WR	00	AA	00	80	00	BB	00	80	00	FF
WR	00	AA	00	90	00	BB	00	90	00	FF
WR	00	AA	01	00	00	BB	01	00	00	FF
WR	00	AA	01	10	00	BB	01	10	00	FF
WR	00	AA	01	20	00	BB	01	20	00	FF
WR	00	AA	01	30	00	BB	01	30	00	FF
WR	00	AA	01	40	00	BB	01	40	00	FF
WR	00	AA	01	50	00	BB	01	50	00	FF
WR	00	AA	00	50	00	BB	01	50	00	FF
WR	00	AA	00	60	00	BB	01	40	00	FF
WR	00	AA	00	70	00	BB	01	30	00	FF
WR	00	AA	00	80	00	BB	01	20	00	FF
WR	00	AA	00	90	00	BB	01	10	00	FF
WR	00	AA	01	00	00	BB	01	00	00	FF
WR	00	AA	01	10	00	BB	00	90	00	FF
WR	00	AA	01	20	00	BB	00	80	00	FF
WR	00	AA	01	30	00	BB	00	70	00	FF
WR	00	AA	01	40	00	BB	00	60	00	FF
WR	00	AA	01	50	00	BB	00	50	00	FF
WR	00	AA	01	20	00	BB	02	50	00	FF
WR	00	AA	01	30	00	BB	02	50	00	FF
WR	00	AA	01	40	00	BB	02	50	00	FF
WR	00	AA	01	50	00	BB	02	50	00	FF
WR	00	AA	01	50	00	BB	02	40	00	FF
WR	00	AA	01	50	00	BB	02	30	00	FF
WR	00	AA	01	50	00	BB	02	20	00	FF
WR	00	FF	FF	00	00	00	00	00	00	00

### G.3 Kalibrační deska



Zmenšeno na 75 % původní velikosti.

## H FOTODOKUMENTACE







